



ICT-ala, ilmasto ja ympäristö

ICT-alan ilmasto- ja
ympäristöstrategiaa
valmistelevan työryhmän
väliraportti

Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2020:9

LVM LIIKENNE- JA
VIESTINTÄMINISTERIÖ

#ICTILMASTO

Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2020:9

ICT-ala, ilmasto ja ympäristö

ICT-alan ilmasto- ja ympäristöstrategiaa valmistelevan työryhmän väliraportti

Liikenne- ja viestintäministeriö

ISBN PDF: 978-952-243-601-6
Kuvat: Elsa Mustaparta
Taitto: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2020

Kuvailulehti

Julkaisija	Liikenne- ja viestintäministeriö		15.6.2020
Tekijät	Tuuli Ojala, Markus Mettälä, Marja Heinonen, Pinja Oksanen (toimittajat)		
Julkaisun nimi	ICT-ala, ilmasto ja ympäristö – ICT-alan ilmasto- ja ympäristöstrategiaa valmistelevan työryhmän väliraportti		
Julkaisusarjan nimi ja numero	Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2020:9		
Diaari/hankenumero	VN/8054/2019	Teema	
ISBN PDF	978-952-243-601-6	ISSN PDF	1795-4045
URN-osoite	http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-601-6		
Sivumäärä	147	Kieli	Suomi
Asiasanat	ilmastostrategia, ilmastovaikutukset, tieto- ja viestintätekniikka-ala, ympäristökysymykset, ympäristövaikutukset, palvelinkeskukset, tietotekniikka, viestintäverkot		
Tiivistelmä <p>Liikenne- ja viestintäministeriö asetti työryhmän ajalle 1.11.2019–30.11.2020 valmistelemaan tieto- ja viestintätekniikka-alan (ICT-ala) ympäristö- ja ilmastostrategiaa. Tavoitteena on muodostaa yhteinen näkemys ICT-alan ilmasto- ja ympäristövaikutuksista ja suositella keinoja, joilla vaikutuksia voidaan hallita. Tämä on työryhmän väliraportti, joka koostaa yhteen tietoa ICT-alan ympäristövaikutuksista ja luo tilannekuvan, jonka perusteella voidaan jatkaa keskustelua tarvittavista toimenpiteistä.</p> <p>Raportissa tarkastellaan ICT-alan kahtalaista roolia ilmaston ja ympäristön kannalta. ICT-ala tarvitsee infrastruktuuria, joka aiheuttaa energian- ja materiaalinkulutusta ja päästöjä. Datamäärät kasvavat voimakkaasti uusien teknologioiden ja sovellusten myötä, ja asettavat haasteen energiatehokkaiden ratkaisujen kehittämiseksi. Lisäksi ICT-päätelaitteisiin liittyy suuria materiaaliavirtoja ja elektroniikkajätteen määrä kasvaa nopeasti. ICT-alalla on merkittävä rooli ilmasto- ja ympäristöystävällisemmän yhteiskunnan mahdollistajana. Päästövähennysten mahdollistamisen lisäksi ICT tukee ilmastonmuutokseen sopeutumista ja ilmaston ja ympäristön tutkimusta. ICT-alan ilmasto- ja ympäristövaikutusten vertailua ja seuraamista vaikeuttaa, että käytössä ei ole yhtenäisiä ja systemaattisia tapoja raportoida alan energiankulutuksesta ja päästöistä tai päästövähennysvaikutuksista muilla aloilla.</p>			
Kustantaja	Liikenne- ja viestintäministeriö		
Julkaisun myynti/jakaja	Sähköinen versio: julkaisut.valtioneuvosto.fi Julkaisumyynti: vnjulkaisumyynti.fi		

Presentationsblad

Utgivare	Kommunikationsministeriet		Juni 2020
Författare	Tuuli Ojala, Markus Mettälä, Marja Heinonen, Pinja Oksanen (redaktörer)		
Publikationens titel	IKT-branschen, klimatet och miljön – Mellanrapport av den arbetsgrupp som bereder klimat- och miljöstrategin för IKT-branschen		
Publikationsseriens namn och nummer	Kommunikationsministeriets publikationer 2020:9		
Diarie- /projektnummer	VN/8054/2019	Tema	
ISBN PDF	978-952-243-601-6	ISSN PDF	1795-4045
URN-adress	http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-601-6		
Sidantal	147	Språk	finska
Nyckelord	klimatstrategi, klimatpåverkan, IKT-branschen, miljöfrågor, miljöpåverkan, serverhallar, informationsteknik, kommunikationsnät		
Referat Kommunikationsministeriet utsåg en arbetsgrupp för perioden 1.11.2019–30.11.2020 för att bereda en miljö- och klimatstrategi för informations- och kommunikationsteknikbranschen (IKT-branschen). Målet är att skapa en gemensam syn på branschens klimat- och miljöpåverkan och att rekommendera metoder för att hantera konsekvenserna. Detta är arbetsgruppens mellanrapport, som samlar ihop information om IKT-branschens miljökonsekvenser och skapar en lägesbild utifrån vilken man kan fortsätta diskussionen om nödvändiga åtgärder. I rapporten granskas IKT-branschens dubbla roll med tanke på klimatet och miljön. IKT-branschen behöver infrastruktur, vilket orsakar energi- och materialförbrukning och utsläpp. Mängden data ökar kraftigt i och med ny teknik och nya IKT-tillämpningar, och utgör en utmaning för utvecklingen av energieffektiva lösningar. Dessutom medför IKT-utrustningen stora materialflöden och mängden elektronikavfall ökar snabbt. IKT-branschen har en viktig roll i att möjliggöra ett mer klimat- och miljövänligt samhälle. Förutom att den tillåter utsläppsminskningar stöder IKT anpassningen till klimattförändringen och forskning kring klimat och miljö. Jämförelsen och uppföljningen av IKT-branschens klimat- och miljökonsekvenser försvåras av att det inte finns enhetliga och systematiska sätt att rapportera om energiförbrukningen och utsläppen inom branschen eller om effekterna av utsläppsminskning inom andra branscher.			
Förläggare	Kommunikationsministeriet		
Beställningar/ distribution	Elektronisk version: julkaisut.valtioneuvosto.fi Beställningar: vnjulkaisumyynti.fi		

Description sheet

Published by	Ministry of Transport and Communications		June 2020
Authors	Tuuli Ojala, Markus Mettälä, Marja Heinonen, Pinja Oksanen (editors)		
Title of publication	The ICT sector, climate and the environment – Interim report of the working group preparing an ICT climate and environmental strategy		
Series and publication number	Publications of the Ministry of Transport and Communications 2020:9		
Register number	VN/8054/2019	Subject	
ISBN PDF	978-952-243-601-6	ISSN PDF	1795-4045
Website address URN	http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-601-6		
Pages	147	Language	Finnish
Keywords	climate strategy, climate impacts, ICT sector, environmental issues, environmental impacts, data centres, IT, communication networks		
Abstract <p>The Ministry of Transport and Communications appointed a working group to develop a climate and environmental strategy for the ICT sector for the period from 1 November 2019 to 30 November 2020. The aim is to form a common view on the climate and environmental impacts of the ICT sector and recommend measures to control them. This interim report of the working group compiles information about the ICT sector's environmental impacts and creates a situational picture on which further discussions on needed measures can be based.</p> <p>The report examines the ICT sector's twofold role in climate and environmental issues. The ICT sector needs infrastructure that consumes energy and materials and causes emissions. The amount of data continues to grow considerably due to new technologies and applications, which presents a challenge for developing energy-efficient solutions. In addition, ICT terminals process large material streams and the amount of electronic waste increases rapidly. The ICT sector can play a significant role in making society more climate-friendly and environmentally-friendly. In addition to enabling reductions in emissions, ICT supports adjustment to climate change and environmental and climate research. It is difficult to assess and compare the climate and environmental impacts of the ICT sector due to the lack of uniform and systematic ways to report on energy consumption and emissions in the sector, or emissions reductions in other sectors.</p>			
Publisher	Ministry of Transport and Communications		
Publication sales/ Distributed by	Online version: julkaisut.valtioneuvosto.fi Publication sales: vnjulkaisumyynti.fi		

Sisällys

1. Johdanto	12
1.1. Työn tausta ja tavoite	12
1.1.2. Työn organisointi	13
1.2. EU:n ja verrokkimaiden aloitteita ICT:n ilmasto- ja ympäristökysymyksissä	14
2. ICT-alan keskeiset ilmasto- ja ympäristökysymykset ja strategiatyön rajaus	20
2.1. Digitalisaatio ja datatalous.....	20
2.2. ICT-ala päästöjen lähteenä ja ympäristö- ja ilmastohaasteiden ratkaisijana	21
2.2.1. Strategiatyön rajausta.....	24
2.2.2. ICT-ala ja sähköenergian käyttö.....	25
2.2.3. Sähköenergian kulutuksesta kasvihuonekaasupäästöihin	27
2.3. Kuluttajien rooli.....	29
3. Datakeskukset	34
3.1. Datakeskukset ja pilvipalvelut Suomessa	34
3.2. Datakeskusten suunnittelu, rakentaminen ja operointi	36
3.2.1. Datakeskusautomaatio	37
3.3. Energiatehokas datakeskus	38
3.3.1. Datakeskuksen sähköjärjestelmä	40
3.3.2. Jäähdytys	41
3.3.3. Muu energian kulutus	44
3.4. Datakeskusten muut ympäristövaikutukset	44
3.5. Tulevaisuuden kehityskulkuja.....	45
3.5.1. Datakeskuksista reunalaskentaan?	45
3.5.2. Kvanttilaskenta	46
3.6. Keinoja datakeskusten ilmasto- ja ympäristövaikutusten hallintaan.....	47
3.6.1. Energiatehokkuuden lisäämisen kannusteet ja esteet.....	47
3.6.2. Sähkön lähteet.....	48
3.6.3. Hukkalämmön hyödyntäminen	48
3.6.4. Muita keinoja	50
3.7. CASE: Superkonekeskus	51
4. Verkot	53
4.1. Nykyiset teknologiset ratkaisut	53
4.1.1. Kiinteät laajakaistayhteydet	54

4.1.2. Mobiililaajakaistayhteydet	55
4.2. Verkkojen energiankulutus ja ilmastonäkökohdat	57
4.2.1. Verkkojen energiatehokkuus	58
4.2.2. Standardisointi ja kansainvälinen yhteistyö	64
4.3. Verkkojen käyttö, rakentaminen ja purkaminen, kierrättäminen	65
4.3.1. Elinkaaren hallinta yleisesti	65
4.3.2. Teleyritysten energiankulutus- ja hiilijalanjälkiraportointi	65
4.3.3. Laitteiden ja materiaalien kierrätys	67
4.4. Tulevaisuuden verkkoteknologioiden rooli	68
4.4.1. 6G-verkkoarkkitehtuuri	68
4.4.2. Kestävän kehityksen rooli 6G:ssä	69
4.5. Keinoja verkkojen ilmasto- ja ympäristövaikutusten hallintaan.....	70
4.5.1. Mobiiliverkkojen energiatehokkuutta parantavia keinoja	70
4.5.2. Uusiutuvan energian tuotanto tukiasemapaikoilla	71
4.5.3. Verkkojen yhteiskäyttö ja yhteisrakentaminen.....	72
4.5.4. Muita keinoja ja verkkojen ympäristönäkökohtia	73
5. Päätelaitteet	75
5.1. Päätelaitteiden kysyntä	75
5.2. Päätelaitteiden elinkaari	77
5.3. Päätelaitteisiin liittyvät materiaaliveirrat	78
5.3.1. Kriittiset raaka-aineet.....	79
5.3.2. Haitalliset aineet	80
5.3.3. Suomen primääriraaka-ainevarannot ja niiden hyödyntäminen.....	80
5.4. Päätelaitteiden energiankulutus	80
5.5. Päätelaitteiden ympäristövaikutusten vähentäminen: erityistarkastelussa materiaalien kierrätys	82
5.5.1. Kierrätysasteet.....	84
5.5.2. Kierrätyksen tekninen toteutus	85
5.5.3. Eri ICT-laitteiden tai komponenttien kierrätys.....	86
5.5.4. Kierrätyksen haasteet.....	88
5.6. Tulevaisuuden yleistyvät päätelaitteet ja uusien materiaalien mahdollisuudet.....	89
6. Ohjelmistot.....	91
6.1. Ohjelmistojen jalan- ja kädenjälki	91
6.2. Pilvipalvelut ja SaaS (Software as a Service).....	96
7. Keskeiset nousevat teknologiat ilmasto- ja ympäristönäkökulmasta	98
7.1. Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen	99
7.2. Lohkoketjut ja niiden sovellusalueet.....	101

7.3. Robotiikka ja autonomiset järjestelmät.....	103
7.4. Kvanttitekнология.....	105
7.5. Lisätty ja virtuaalinen todellisuus sekä median sovellusalueet.....	107
7.6. IoT-sovellukset.....	110
8. ICT ilmasto- ja ympäristöhyötyjen tuottajana	113
8.1. ICT hiilineutraalin ja resurssitehokkaan yhteiskunnan mahdollistajana.....	114
8.1.1. Älykkäät kaupungit ja asuminen.....	114
8.1.2. Älykäs liikenne.....	117
8.1.3. Digitalisoituva teollisuus	120
8.1.4. Ratkaisut luonnonvara-alalla	122
8.1.5. Julkiset palvelut	123
8.1.6. Kuluttajapalvelut	124
8.2. Ilmaston- ja ympäristöntutkimus ja ilmastomuutokseen sopeutuminen.....	126
8.2.1. ICT ilmastomuutokseen sopeutumisen tukena.....	126
8.2.2. ICT ja ympäristöntutkimus	127
8.2.3. Esimerkkejä ICT:stä luonnon monimuotoisuuden tutkimisessa ja suojelussa.....	127
9. Case-esimerkit ICT:stä kasvihuonekaasupäästö- vähennysten mahdollistajana	129
9.1. Logistiikka.....	129
9.1.1. Digitalisaation päästövähennysvaikutukset eri skenaarioissa ja muutostrendeissä	132
9.1.2. Yhteenveto	136
9.2. Energia-ala.....	137
9.2.1. Ratkaisuja sähkön ja lämmön tuotannossa, jakelussa ja käytössä	138
9.2.2. Esimerkkejä Suomesta.....	140
10. Johtopäätökset.....	143
Liite	146

LUKIJALLE

Liikenne- ja viestintäministeriössä on tehty pitkään töitä liikenteen ilmasto- ja ympäristövaikutusten vähentämiseksi. Tieto- ja viestintäteknologian osalta ilmasto- ja ympäristövaikutukset ovat nousseet laajempaan keskusteluun vasta viime aikoina. Suomi on edelläkävijä kansallisen ilmasto- ja ympäristöstrategian laatijana.

Tämä on liikenne- ja viestintäministeri Sanna Marinin marraskuussa 2019 asettaman ICT-alan ilmasto- ja ympäristöstrategiaa valmistelevan työryhmän väliraportti. Työryhmän loppuraportti on tarkoitus julkaista ensi syksynä. Tässä väliraportissa luodaan tilannekuva ICT-alan myönteisistä ja kielteisistä ilmastovaikutuksista eli sektorin hiilikädenjäljestä ja hiilijalanjäljestä sekä muista ympäristövaikutuksista.

Tämän varsin kattavan raportin aikaansaaminen ei olisi ollut mahdollista ilman rakentavaa yhteistyötä ja työryhmän jäsenorganisaatioiden sekä muiden asiantuntijoiden panostusta. Tähän asti tehdyn työn pohjalta on hyvä jatkaa toimintasuositusten pohtimista työn seuraavassa vaiheessa.

Ilmastonmuutos ja ympäristön tilan heikkeneminen ovat aikamme vakavia haasteita. On tärkeää ymmärtää, miten ICT-alan kielteiset vaikutukset ilmastoon ja ympäristöön voidaan minimoida. Myönteistä on, että alan sähkönkulutuksen kasvu on onnistuttu pitämään kohtuullisella tasolla datamäärien kasvusta huolimatta ja että Suomessa alan hiilidioksidipäästöt ovat pienet puhtaasti sähköntuotannon ansiosta.

ICT-alan tarjoamat mahdollisuudet kaikilla yhteiskunnan sektoreilla antavat paljon toivoa siitä, että päästöjen merkittävä vähentäminen on mahdollista. Suomalaisella osaamisella on myös runsaasti annettavaa tähän työhön.

Alan energiatehokkuuden parantaminen ja myönteisten vaikutusten maksimointi vaatii jatkuvaa kehitystyötä. Uudet teknologiat tuovat niin mahdollisuuksia kuin haasteita, joita meidän on tärkeää ymmärtää paremmin oikeiden askelten ottamiseksi eteenpäin. Samoin päätelaitteiden materiaalivirtojen parempaan hallintaan on tärkeää löytää ratkaisuja. Työn seuraavassa vaiheessa jatkamme keskustelua näistä aiheista.

Päivi Antikainen

Toukokuu 2020

1. Johdanto

1.1. Työn tausta ja tavoite

Liikenne- ja viestintäministeriö asetti 1.11.2019 työryhmän valmistelemaan tieto- ja viestintäteknologia-alan (ICT-ala) ilmasto- ja ympäristöstrategiaa. Tavoite hiilineutraalista Suomesta vuoteen 2035 mennessä vaatii toteutuakseen päästövähennyksiä kaikilla aloilla. ICT-ala tuottaa päästövähennyksiä edistäviä ratkaisuja, mutta samalla on kiinnitettävä huomiota alan omaan hiilijalanjälkeen ja muihin ympäristövaikutuksiin.

ICT-alan ilmasto- ja ympäristökysymykset ovat vasta hiljattain alkaneet herättää laajempaa huomiota. Suomessa ja maailmalla on julkaistu arvioita ICT:n positiivisista vaikutuksista ilmastonmuutoksen hillitsemisen kannalta. Samoin on nähty huolestuneita otsikkoja alan kasvavasta hiilijalanjäljestä ja materiaalinkulutuksesta siirretyn datan määrän jatkuvan kasvun ja uusien laitteiden markkinoille tulon vuoksi.

Muun muassa teleyritykset ovat jo pidemmän aikaa tehneet erilaisia selvityksiä omista ilmasto- ja ympäristövaikutuksistaan, samoin suomalaisissa yliopistoissa ja tutkimuslaitoksissa on tehty tutkimuksia ICT-alan ilmasto- ja ympäristövaikutusten eri näkökohdista. Myös liikenne- ja viestintäministeriössä valmisteltiin virkamiestyönä vuonna 2013 tiivis vihreän ICT:n ohjelma. Ohjelmaa toimenpantiin muun muassa laatimalla konesalien ympäristöluokitus työkaluksi tietokonesalien suunnittelussa¹ sekä selvittämällä mediasisältöjen energiankulutusta². Kansainvälinen televiestintäliitto ITU on 2010-luvun alussa julkaissut suosituksia metodologioista ICT-alan ympäristövaikutusten arvioimiseksi.³

Edelleen ajankohtainen on kuitenkin liikenne- ja viestintäministeriön vuoden 2013 ohjelman päätelmä: ICT-alan kestävyyskysymyksistä tarvitaan kokonaisvaltaista tietoa, joka olisi julkista ja kaikkien saatavilla. ICT-tuotantoketjun osien ja digitaalisten palvelujen negatiivisten ja positiivisten ympäristö- ja ilmastovaikutusten mittaamiseksi ja seuraamiseksi ja toiminnan ohjaamiseksi tarvittaisiin yhtenäisiä ja läpinäkyviä menetelmiä. ICT-alan nopea kehitys lisää vaikutusten arvioinnin haastavuutta.

Tähän väliraporttiin on koottu laajan hallinnon, järjestöjen, korkeakoulujen ja yritysten edustajista koostuvan työryhmän kuvaus ICT-alan ilmasto- ja ympäristövaikutuksista Suomessa. Kuvaus perustuu siihen tietoon, mitä tällä hetkellä on saatavilla, ja on selvää, että kuva ICT-alan vaikutuksista tulee jatkossa edelleen tarkentumaan. Laaja-alaisessa yhteistyössä tehtävässä ICT-alan ilmasto- ja ympäristövaikutusten tarkastelussa

¹ Liikenne- ja viestintäministeriö 2014: TIKO - Sustainability rating system for data centers. User manual, v0.4 for New Constructions.

² VTT 2015: Esiselvitys: TV-sisältöjen monikanavaisen jakelun energiankulutuksen arviointi.

³ ITU-T 2011: Overview and general principles of methodologies for assessing the environmental impact of information and communication technologies.

Suomi on etujoukoissa. Tämä on luontevaa maalle, joka on digitalisaatiokehityksessä maailman johtavia maita.

Raportissa tarkastellaan alan energiankulutusta ja muita ympäristövaikutuksia sekä ICT:n hyötyjä päästövähennysten ja muiden ympäristöhyötyjen edistämisessä. Raporttiin on myös koostettu mahdollisia keinoja alan negatiivisten ympäristövaikutusten vähentämiseksi. Keinovalikoima toimii jatkopohdinnan apuna ja keskustelun pohjana. Varsinaiset toimenpide-ehdotukset sisältävä loppuraportti julkaistaan marraskuussa 2020. Loppuraportissa myös syvennetään osaa tässä raportissa lyhyemmin käsitellyistä teemoista.

Vuonna 2015 sovittiin globaalisti yhteisestä kestävästä kehityksen toimintaohjelmasta, YK:n Agenda2030:sta. Toimintaohjelman 17 tavoitetta alatavoitteineen tähtäävät keskeisten sosiaalisen, taloudellisten ja ympäristöön liittyvien globaalihaasteiden ratkaisuun 2030 mennessä. Keskustelu ja tutkimustyö digitalisaation ja ICT-alan yhteyksistä Agenda2030-tavoitteiden saavuttamiseen on myös käynnistynyt.⁴

Suomen vahvuuksiksi kestävästä kehitystä koskevissa tutkimuksissa on tunnistettu korkealaatuinen koulutus ja siihen perustuva osaaminen sekä yhteiskunnallisten järjestelmien yleinen vakaus. Keskeisiä haasteita ovat ilmastonmuutos ja luonnonvarojen liiallinen kulutus sekä talous- ja työllisyyskehitys.⁵ Ratkaisuja näihin haasteisiin voidaan löytää hyödyntämällä entistä paremmin ICT:n potentiaalia päästövähennyksissä ja resurssitehokkuuden lisäämisessä saaden samalla markkinoita suomalaiselle osaamiselle muun muassa ohjelmistojen, energiatehokkaiden laitteiden sekä laiteilojen suunnittelussa.

1.1.2. Työn organisointi

Liikenne- ja viestintäministeriön jäseneksi kutsumista organisaatioista 28 nimesi edustajansa strategiaa valmistelevaan työryhmään. Käytännön työn järjestämiseksi perustettiin kaksi alatyöryhmää. Työryhmän jäsenorganisaatioiden lisäksi työryhmän ja alatyöryhmien kokouksissa kuultiin alustuksia asiantuntijoilta ICT-alan eri ilmasto- ja ympäristönäkökohdista.

Alatyöryhmien aiheet olivat 1) infrastruktuuri: palvelinkeskukset, verkot ja päätelaitteet tarkastelunäkökulminaan energian- ja materiaalikulutus ja keinot niiden hillitsemiseksi sekä 2) sovellukset: ohjelmistot sekä alan tarjoamat keinot muilla aloilla kasvihuonekaasupäästöjen ja negatiivisten ympäristövaikutusten vähentämiseksi ml. uusien teknologioiden haasteet ja mahdollisuudet. Työstä on tiedotettu avoimilla verkkosivuilla⁶ sekä yleisötilaisuuksissa.

Sen lisäksi, että työryhmän jäsenorganisaatiot ja yhteistyökumppanit ovat tuoneet asiantuntijuutensa työn käyttöön, työn tueksi on tehty ja teetetty useita lisäselvityksiä.

⁴ IIASA 2019: TWI2050 - The World in 2050. The Digital Revolution and Sustainable Development: Opportunities and Challenges.

⁵ Valtioneuvoston kanslia 2019: Kohti Suomea, jonka haluamme 2050. Kestävästä kehityksen tila vuonna 2019 indikaattorien ja vertailujen valossa.

⁶ <https://valtioneuvosto.fi/hanke?tunnus=LVM033:00/2019>

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom on kerännyt teleyrityksiltä tunnuslukuja viestintäverkkojen ilmasto- ja ympäristökysymyksistä. Liikenne- ja viestintäministeriö on teettänyt selvitykset päätelaitteiden materiaalivirroista (Suomen ympäristökeskus) sekä ICT:n hyödyistä kasvihuonekaasupäästövähennyksissä energia-alalla (VTT). Näiden selvitysten loppuraportit julkaistaan erikseen myöhemmin, tässä raportissa on hyödynnetty selvitysten välituloksia. Traficom on tilannut arvion (Deloitte) nousevien teknologioiden ilmasto- ja ympäristövaikutuksista. Liikenne- ja viestintäministeriössä samaan aikaan ICT:n ilmastotyön kanssa on ollut käynnissä logistiikan digitalisatiostrategian valmistelu, johon tehdystä taustaselvityksestä (Ramboll) osaa hyödynnettiin myös tässä työssä.

Samaan aikaan ICT-alan ilmasto- ja ympäristöstrategiatyön kanssa on Suomessa ollut käynnissä myös muita ICT-alan ilmastonäkökulmia painottavia aloitteita. Sitran omassa työssään rahoittamat selvitykset ja Teknologiateollisuuden vähähiilisyystiekartan ICT-alaa koskevat arviot ovat vahvistaneet ICT-alan vaikutusten tarkastelua maassamme. Myös yrityksiä ja muita toimijoita ilmastotoimiin yhdistävän Climate Leadership Coalition on ollut aktiivinen aiheen parissa. Valtioneuvostotasolla ICT-alan ilmasto- ja ympäristöstrategian kanssa samanaikaisesti käynnissä on muun muassa digitalisaation edistämisen hanke (Valtiovarainministeriö).

Vuonna 2019 työnsä aloittanut uusi Euroopan komissio on kiinnittänyt huomiota ICT-alan mahdollisuuksiin ja haasteisiin. Näitä ja sekä Suomen edustustojen avulla selvitettyjä eräitten Euroopan maiden aloitteita ICT:n ympäristö- ja ilmastokysymyksissä tarkastellaan alla.

1.2. EU:n ja verrokkimaiden aloitteita ICT:n ilmasto- ja ympäristökysymyksissä

Kansainvälisellä tasolla huomio ICT-alan ilmasto- ja ympäristövaikutusten tarkastelussa on tähän asti kiinnittynyt pääasiassa digitalisaation tarjoamiin mahdollisuuksiin päästövähennysten toteuttajana. Aihe on herättänyt enenevissä määrin huomiota Euroopan unionissa. Nykyinen Euroopan komissio on julkaissut strategioita ja aloitteita, joissa ilmasto- ja ympäristövaikutuksia käsitellään monesta näkökulmasta. ICT-sektorin ilmasto- ja ympäristövaikutukset ovat herättäneet huomiota myös muissa valtioissa.

Tähän lukuun on nostettu esimerkkejä vihreistä aloitteista Suomea digitaalisessa kehityksessä lähellä olevista maista sekä Euroopan unionista. Maavertailuun on valittu Suomea yhteiskuntarakenteellisesti ja lainsäädännöllisesti lähellä olevat Ruotsi, Norja ja Tanska, minkä lisäksi luvussa tutkitaan suurten eurooppalaisten maiden Saksan, Ranskan sekä Yhdistyneen kuningaskunnan aloitteita. ICT-alan ilmasto- ja ympäristövaikutukset ovat olleet esillä erityisesti Saksassa.

Euroopan unioni

Euroopan komission 11.12.2019 julkaisemassa Euroopan vihreän kehityksen ohjelmaan (Green deal)⁷ sisältyy ehdotuksia lainsäädäntöaloitteiksi, jotka edistävät EU:n tavoitetta ilmastoneutraalisuuden saavuttamisesta 2050 mennessä. *Green dealin* yhteydessä julkaistavia ICT-alan kannalta olennaisia aloitteita ovat teollisuusstrategia (3/2020), kiertotalouden toimintasuunnitelma (3/2020), akkuja koskevan lainsäädännön uudistus (10/2020) sekä kestävän ja älykkään liikenteen strategia (2020). Komissio korostaa, että samaan aikaan, kun digitaaliset teknologiat toimivat päästövähennysten mahdollistajina, on huolehdittava siitä, että sektori itsessään on kestävä.

Komission maaliskuussa 2020 julkaisemassa kiertotalouden toimintasuunnitelmassa on keskitytty resurssi-intensiivisiin sektoreihin yhtenä prioriteettialueena elektroniikka. Keskeinen osa suunnitelmaa on kestävä tuotepolitiikka, josta on tulossa komission ehdotus ekosuunnitteludirektiivin (2009/125/EY) laajentamisesta ja uudelleenarvioinnista. Lisäksi tuotteille tullaan määrittämään kestävyysperiaatteet, kuten tuotteiden kokonaishiilijalanjälki, kertakäyttöisyyden rajaaminen sekä kiello myymättömien tuotteiden hävittämiseen.

Tarkoituksena on kehittää keinoja lisätä kuluttajien tietoa tuotteesta ja sen elinkaaresta jo ostohetkellä. Kuluttajille tulee oikeus tuotteen korjauttamiseen, vaihto-osiin sekä päivityksiin. Komissio tulee ehdottamaan minimikriteerejä vihreille julkisille hankinnoille, minkä lisäksi otetaan asteittain käyttöön raportointivelvollisuus ympäristöä säästävistä julkisista hankinnoista. Komissio tulee lisäksi esittämään *Circular Electronics* -aloitteen⁸, jossa tullaan hyödyntämään sekä olemassa olevia että uusia instrumentteja elektroniikkalaitteiden eliniän pidentämiseksi.

EU:n digistrategia tukee *Green deal* -tiedonantoa ilmastoneutraaliuden tavoittelussa. Digistrategian avulla pyritään kiertotaloussuunnitelman kanssa linjassa varmistamaan, että laitteet on suunniteltu kestäviksi, huollettaviksi ja uudelleenkäytettäviksi. Kuluttajalla tulisi olla oikeus korjata ja päivittää tuote laitteen elinkaaren pidentämiseksi. Tavoitteena on kehittää aloitteita datakeskusten ilmastoneutraaliuden, korkean energiatehokkuuden ja kestävyuden saavuttamiseksi 2030 mennessä. Lisäksi tarkoitus on kehittää televiestinnän ympäristöjalanjäljen läpinäkyvyyttä.

Euroopan komissio julkaisi digistrategian yhteydessä datastrategian⁹, jonka tarkoituksena on luoda datan sisämarkkinat. Yhteisillä sisämarkkinoilla data voi liikkua vapaasti eri alojen ja maiden välillä. Datan sisämarkkinoiden avulla on tarkoitus edistää myös ilmasto- ja ympäristötavoitteiden saavuttamista. Datastrategiaan kuuluvan *A Common European Green Deal* -aloitteen tarkoitus on optimoida datan käyttö Euroopan vihreän kehityksen ohjelman tavoitteiden saavuttamisessa.

⁷ COM(2019) 640 final: The European Green Deal.

⁸ Euroopan komissio 2020: Shaping Europe's Digital Future.

⁹ COM(2020) 66 final: A European strategy for data.

Toimia EU:n talouden elpymiseksi koronaviruksesta valmistellaan, ja niiden on suunniteltu painottuvan digitalisaation edistämiseen ja ilmastoneutraaliin yhteiskuntaan siirtymiseen.

Norja

Norjassa ei toistaiseksi ole tehty ICT-alan ilmasto- ja ympäristövaikutuksiin liittyvää strategiatyötä, ja aiheen käsittely on muutenkin ollut vähäistä. Norjan hallitus julkaisi vuonna 2016 digitalisaatiostrategian, jossa ilmasto- tai ympäristönäkökulmia ei juurikaan ole huomioitu. Strategiassa todetaan ainoastaan, että ICT-ala tarjoaa paljon mahdollisuuksia kasvihuonepäästöjen vähentämiseen.¹⁰

Alan energiankulutuksen tarkastelu on jäänyt vähäiseksi. Norjan hallituksen julkaisemassa datakeskusstrategiassa¹¹ todetaan, että datakeskusten korkeasta energiankäytöstä johtuvia päästöjä voidaan pienentää käyttämällä uusiutuvista energialähteistä tuotettua sähköä. Norjassa sähkö tuotetaan yli 90 % vesivoimalla. Norja houkuttelee maahan datakeskuksia juuri uusiutuvan energiantuotannon avulla kylmään ilmanalaan yhdistettynä. Myös mediassa on keskitytty energiankulutuksen hillitsemisen sijaan enemmänkin sähkön päästöttömyyteen.

Ruotsi

ICT-alaan liittyvää ilmasto- ja ympäristöstrategiaa ei ole tehty Ruotsissa, eikä sellaista ole tällä hetkellä suunnitteilla. Ala ei muutenkaan ole juurikaan esillä Ruotsin ilmasto-ohjelmissa.

Luonnonsuojeluvirasto on julkaissut digitalisaatioon liittyvän teemaraportin, jossa käsitellään sitä, miten ICT-alan avulla voitaisiin edistää ilmasto- ja ympäristötavoitteiden saavuttamista.¹² Raportissa on nostettu esimerkkejä tuotannon, energian, liikenteen ja kulutuksen osalta. Lisäksi osana hallituksen *Fossilfritt Sverige* -aloitetta on laadittu ala-kohtaisia tiekarttoja, joista yksi koskee digitalisaatiokonsultointia.¹³ Tiekartassa on määritelty alan energiankulutukseen ja päästöihin liittyviä tavoitteita, sekä ehdotettu toimia ympäristötavoitteiden edistämiseksi digitalisaation avulla.

Ruotsissa on edistetty datakeskusten hukkalämmön hyödyntämistä. Vuonna 2017 alkanut *Stockholm Data Parks* on Tukholman kaupungin sekä kaukolämpö-, sähkönjakelu ja valokuituverkkotoimijoiden yhteistyöhanke datakeskusten hukkalämmön hyödyntämiseksi kaukolämpöverkossa. Tukholman kaupungin tavoitteena on, että 10 prosenttia asunnoista lämmitettäisiin kaukolämpöverkon viereen rakennettujen datakeskuspuistojen avulla.¹⁴ Rakenteilla on kolme uutta datakeskusta, joiden hukkalämmön

¹⁰ Norwegian Ministry of Local Government and Modernisation 2016: Digital agenda for Norway in brief.

¹¹ Ministry of Trade, Industry and Fisheries 2018: Powered by Nature - Norway as a data centre nation.

¹² Naturvårdsverket 2019: Digitalisering och miljömålen.

¹³ Fossilfritt Sverige 2018: Färdplan för fossilfri konkurrenskraft – Digitaliseringskonsultbranschen.

¹⁴ <https://stockholmdataparks.com/benefits-of-green-computing-in-stockholm/>

avulla on arvioitu voitavan lämmittää ainakin 35 000 asuntoa.¹⁵ Tällä hetkellä datakeskusten avulla lämmitetään 10 000 asuntoa. Hyötykäyttöä on tutkittu myös Luulajassa.¹⁶

Yrityksistä Ericsson on tutkinut yli 20 vuotta digitalisaation ilmastovaikutuksia ja julkaisut aiheeseen liittyviä raportteja. Viimeisimpänä Ericsson julkaisi ICT-sektorin hiilijalanjäljen arviointiin keskittyvän teemaraportin¹⁷ sekä siihen liittyvän laajemman taustamuiston¹⁸.

Tanska

Tanska aloitti ICT-alaan liittyvän ilmasto- ja ympäristötyön varhain. Vuonna 2008 julkaistiin vihreän IT:n toimintasuunnitelma¹⁹, jossa esiteltiin sekä vihreitä aloitteita IT-sektorin ilmasto- ja ympäristöystävällisyyden lisäämiseksi että keinoja, joilla IT-ratkaisuilla voidaan vaikuttaa muihin sektoreihin. Toimintasuunnitelman julkaisun jälkeen asia jäi kuitenkin vähemmälle huomiolle.

Tanskan parlamentti päätti joulukuussa 2019 uudesta kunnianhimoisesta ilmastolaista, jonka tavoitteena on vähentää kasvihuonepäästöjä 70 %.²⁰ Konkreettiset toimet lain päästötavoitteiden saavuttamiseksi on tarkoitus esitellä tulevassa toimintasuunnitelmassa, jonka on määrä kattaa myös IT-ala.

Ilmastolain asettamisen yhteydessä hallitus nimesi 13 yhteistyöalaa, jotka ovat julkaisleet alakohtaiset suositukset toimista, joilla alan päästöjä voitaisiin vähentää. Yksi aloista on palvelut, IT-ala ja konsultointi. Digitalisaation mahdollistaman energiatehokkuuden parantamisen lisäksi IT-alan suosituksissa ehdotetaan muun muassa ympäristövaikutuksiin liittyvän tiedon yhdenmukaistamista ja läpinäkyvyyden lisäämistä, ympäristönäkökohtien huomioon ottamista julkisissa hankinnoissa sekä datakeskusten hukkalämmön hyödyntämistä.²¹

Saksa

ICT-alan ilmasto- ja ympäristövaikutukset ovat olleet runsaasti esillä Saksassa. Maaliskuussa 2020 Saksan ympäristöministeriö julkaisi ympäristöpoliittisen digitaalisen agendan²², joka syventää aiempia strategioita²³ ja jonka tavoite on tuoda digitalisaatio ympäristön, luonnon ja ilmaston palvelukseen. Agenda painottaa digitalisaatiota ainoana keinona kestävä kasvun aikaansaamiseksi ja samalla kiinnittää huomiota ICT-alan

¹⁵ <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/stockholm-data-parks-announces-three-new-facilities/>

¹⁶ <https://www.ri.se/sv/vad-vi-gor/projekt/datacenter-vaxthusodling>

¹⁷ Ericsson 2020: A quick guide to your digital carbon footprint.

¹⁸ Ericsson 2020: Background report to 'A guide to your digital climate impact'.

¹⁹ Ministry of Science, Technology and Innovation 2008: Action Plan for Green IT in Denmark.

²⁰ Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet 2019: Forslag til Lov om klima.

²¹ Regeringens klimapartnerskaber 2020: Service, IT og rådgivning.

²² BMU 2020: Umweltpolitische Digitalagenda.

²³ BMU 2019: Get the Environment into those Algorithms! The BMU's key points for a digital policy agenda for the environment.

omaan ympäristöjalanjälkeen. Agenda sisältää 70 toimea. Kansallisten aloitteiden lisäksi Saksa tukee EU-tasoisien yhteisten ympäristöstandardien kehittämistä. ICT:n ympäristönäkökulmia on tarkoitus painottaa myös Saksan EU:n neuvoston puheenjohtajuuskaudella syksyllä 2020.²⁴

Ympäristökysymykset ovat esillä myös Saksan kansallisessa tekoälystrategiassa. Strategiaan sisältyy sellaisten hankkeiden tukeminen, jotka auttavat ilmasto- ja ympäristötavoitteiden saavuttamisessa ja edistävät ilmastoystävällistä digitalisaatiota.²⁵

Saksan liittohallitus on vuodesta 2008 lähtien soveltanut toiminnassaan vihreän IT:n ohjelmaa, jonka tavoitteena on pienentää liittovaltionhallinnon ICT:hen liittyvää energiankulutusta. Ohjelman myötä kaikki ministeriöt ovat sitoutuneet kolmeen tavoitteeseen: energiatehokkaisiin datakeskuksiin, kestäviin laitteistohankintoihin sekä *Blauer Engel* -ympäristömerkintään.²⁶ *Blauer Engel* -ympäristömerkintä voidaan myöntää tuotteelle, joka ottaa elinkaarenaikaiset ympäristö- ja terveysvaikutukset huomioon. Kriteeristöjä on laadittu muun muassa elektroniikkatuotteille, datakeskuksille sekä sovellusohjelmistoille. Liittohallituksella on lisäksi ohjelma materiaalinkäytön tehostamiseksi, ja ohjelman keväällä 2020 julkaistavassa päivityksessä tarkastellaan ICT:n hyötyjä tuotannon muuttamisessa resurssitehokkaammaksi.²⁷

Datakeskusten *Blauer Engel* -kriteeristön²⁸ avulla pyritään lisäämään datakeskusten tehokkuutta sekä varmistamaan, että ympäristönäkökulmat otetaan huomioon myös tulevista investoinneista. Kriteeristössä on määritelty vaatimukset sekä rakennuksille että IT-laitteille. Energiatehokkuutta pitää mitata ja siitä tulee raportoida vaatimusten mukaisesti, minkä lisäksi datakeskuksen tulee käyttää joko uusiutuvaa tai yhdistetyllä lämmön- ja energiatuotannolla tuotettua energiaa. Datakeskuksella tulee olla pitkän aikavälin strategia energian ja materiaalin käytön tehostamiseksi.

Sovelluksille määritellyn *Blauer Engel* -ympäristömerkinnän tarkoituksena on kannustaa pienentämään ICT-sektorin energiankulutusta sekä tehostaa materiaalinkäyttöä. Sovelluksille määritellyt kriteerit²⁹ koskevat ensisijaisesti tietokoneilla käytettäviä ohjelmistosovelluksia. Kriteeristön ala on tarkoitus laajentaa seuraavan päivityksen yhteydessä myös muihin sovelluksiin, kuten mobiilisovelluksiin. Merkinnän saadakseen ohjelmistoratkaisun tulee olla energiatehokas sekä hyödyntää laiteresursseja tehokkaasti.

²⁴ <https://www.bmu.de/en/topics/sustainability-international/digitalisation-and-the-environment/sustainable-digital-transformation/>

²⁵ <https://www.bmu.de/en/topics/sustainability-international/digitalisation-and-the-environment/our-support-programme-for-artificial-intelligence/>

²⁶ <https://www.bmu.de/en/topics/sustainability-international/digitalisation-and-the-environment/sustainable-digital-transformation/>

²⁷ <https://www.bmu.de/en/topics/economy-products-resources-tourism/resource-efficiency/overview-of-german-resource-efficiency-programme-progress/>

²⁸ Blue Angel – The Environmental Label 2019: Energy Efficient Data Center Operation, Basic Award Criteria.

²⁹ Blue Angel – The Environmental Label 2020: Resource and Energy-Efficient Software Products, Basic Award Criteria.

Ranska

Ranskassa ICT-alaan liittyviä ilmasto- ja ympäristöhaasteita on tunnistettu, mutta Ranska ei ole julkaissut kansallista ICT-alaa koskevaa ilmasto- tai ympäristöstrategiaa. ICT-sektori on kuitenkin huomioitu Ranskan uudessa, helmikuussa 2020 vahvistetussa kiertotaloutta ja hävikin vähentämistä koskevassa laissa. Lain avulla halutaan edistää ilmastoystävällisiä käytäntöjä. Siinä säädetään esimerkiksi tuotteiden valmistajien velvollisuudesta tiedottaa kuluttajia aiempaa paremmin tuotteiden ympäristövaikutuksista, elinkaaresta ja korjausmahdollisuuksista.

Internet-palveluntarjoajien ja matkapuhelinoperaattorien on tammikuun 2022 alusta lähtien näytettävä tiedot kulutetun datan määrästä ja siitä aiheutuneista kasvihuonekaasupäästöistä. Tarkoituksena on lisätä kuluttajien tietoisuutta kulutuksen ilmasto- ja ympäristövaikutuksista, jolloin kuluttajalla on mahdollisuus arvioida oman toimintansa ja digitaalisen kulutuksensa vaikutuksia.³⁰

Uusi laki tuo myös määräyksiä elektroniikkatuotteiden korjattavuuteen. Tavoitteena on tarjota kuluttajalle tietoa ostopäätöksen tekemisen tueksi, sekä kannustaa tuottajia parantamaan tuotteiden korjattavuutta. Vuonna 2021 käyttöön otetaan merkintä, joka kuvastaa elektroniikkatuotteen korjattavuutta ja elinikää asteikolla 1-10. Merkintä koskee erilaisia elektroniikkatuotteita, kuten älypuhelimia, tietokoneita ja televisioita. Tuottajien tulee julkistaa myös merkintään liittyvät yksityiskohdat, eli millä perusteilla kyseinen merkintä on tuotteelle myönnetty. Lisäksi laki tuo velvoitteita tuotteiden varaosien saatavuudelle ja toimitukselle.

Yhdistynyt kuningaskunta

Yhdistyneen kuningaskunnan ICT-sektoriin liittyvä ilmasto- ja ympäristötyö on tähän mennessä keskittynyt valtionhallinnon toimintaan. Vuonna 2011 osana valtionhallinnon ICT-strategiaa laadittiin vihreän ICT:n strategia.³¹ Strategiaan liittyen aiheesta on julkaistu vuosittaisia raportteja, joissa käsitellään valtionhallinnossa kuluneena vuonna toteutuneita toimenpiteitä sekä listataan keinoja tavoitteiden saavuttamiseksi tulevaisuudessa. Vuonna 2018 julkaistiin päivitetty versio valtionhallinnon vihreän ICT:n strategiasta, kestävän teknologian strategia vuoteen 2020.³²

Ohjausta on pyritty laajentamaan myös yksityiselle sektorille. Ympäristö-, elintarvike- ja maatalousministeriö julkaisi vuonna 2019 yrityksille suunnatun ohjekirjan kestävään ICT-sektoriin.³³ Ohjeessa käsitellään ICT-alan kestävään kehitykseen liittyviä haasteita ja mahdollisuuksia sekä suositellaan keinoja kohti kestävämpää ICT:tä.

³⁰ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/DP%20Loi%20anti-gaspillage.pdf>

³¹ HM Government 2011: Greening Government: ICT Strategy.

³² Department for Environment, Food & Rural Affairs 2018: The greening government: sustainable technology strategy 2020 – sustainable technology for sustainable government.

³³ Department for Environment, Food & Rural Affairs 2019: Helping businesses create greener, more sustainable future through ICT.

2. ICT-alan keskeiset ilmasto- ja ympäristökysymykset ja strategiatyön rajaus

2.1. Digitalisaatio ja datatalous

Digitalisaatio muokkaa yhteiskuntia maailmanlaajuisesti. Tieto- ja viestintäteknologian käyttö yleistyy edelleen ja uusia sovelluksia otetaan käyttöön eri aloilla. Palvelujen digitalisaation tavoitteena on parantaa ihmisten elämää, yritysten tulosta, yhteiskunnan toimivuutta tai vaikkapa tehostaa valtion päätöksentekoa. Digitalisaatio näkyy esimerkiksi yleistyvinä digitaalisina julkisina palveluina.

Suomi kuuluu digitalisaation kärkimaihin. Euroopan unionissa nopeiden laajakaistayhteyksien saatavuutta, kansalaisten digitaalisia taitoja ja internetin käyttöä, yritysten ja julkishallinnon palvelujen digitalisoitumista sekä ICT-alan tutkimusta mitataan DESI-indeksillä (Digital Economy and Society Index). Suomi on Ruotsin, Tanskan ja Alankomaiden ohella vertailun kärkikaartia, vuonna 2019 vertailun johtomaa. DESI-I-vertailussa, joka sisältää myös EU:n ulkopuolisia maita (muun muassa Etelä-Korea, Islanti, Norja ja Yhdysvallat), EU:n kärkimaat Suomi mukaan luettuna pärjäävät erinomaisesti.³⁴

ICT-toimialan – tietokoneiden sekä elektronisten ja optisten tuotteiden valmistus, televiestintä, tietojenkäsittelypalvelut – osuus Suomen bruttokansantuotteesta oli vuonna 2018 noin 5,8 prosenttia.³⁵ Suomessa ICT-alan asiantuntijoiden osuus kaikista työntekijöistä vuonna 2018 oli EU-maiden korkein, 7,2 prosenttia.³⁶

ICT-alan tuottamat palvelut muuttavat ihmisten välisen vuorovaikutuksen tapoja ja eri alojen prosesseja. Muutama vuosikymmen sitten harva osasi kuvitella, miten matkaviestimet ja digitaaliset palvelut muuttavat työskentelyä ja vapaa-ajanviettoamme. Samoin emme vielä tiedä, miten virtuaalitodellisuus, lisätty todellisuus, ääni- ja eleohjaus, esineiden internet (Internet of Things, IoT), lohkoketjut, kvanttilaskenta ja tällä hetkellä vasta kehittyvät teknologiat muuttavat tapojamme toimia tai millaisia ulkoisvaikutuksia niillä on.

Laitteiden, palveluiden ja koko yhteiskunnan toimiessa yhä enemmän verkossa kertyy valtavat määrät tietoyksiköitä eli dataa niin palveluista, laitteista, käyttäjistä, yrityksistä

³⁴ <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/desi>
<https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/how-digital-europe-compared-other-major-world-economies>

³⁵ <https://www.ficom.fi/ict-ala/tilastot/ict-toimiala-ja-bruttokansantuote>

³⁶ <https://www.ficom.fi/ict-ala/tilastot/ict-alan-ty%C3%B6lliset-ja-koulutus>

kuin muistakin yhteiskunnan osatekijöistä. Puhutaan maailman datafikaatiosta (datafication).³⁷ Datan säilömiseen, prosessointiin ja analysointiin tehdään suuria investointeja ja esimerkiksi osa nykyisten suuryritysten menestyksestä perustuu niiden kykyyn kerätä ja hyödyntää dataa sekä käyttää sitä yksilön toiminnan ennakoimiseen.³⁸ Digitaalisiaatio on johtanut datatalouden syntyyn.

Datataloudessa tiedon saatavuus ja siirrettävyys ovat keskeinen osa arvonluontia. Euroopan komissio arvioi joitakin vuosia sitten, että EU:n datatalouden arvo voisi vuoteen 2020 mennessä kasvaa 739 miljardiin euroon. Datayritysten määrä kasvaisi sadalla tuhannella yli 350 000 yritykseen ja datatyöntekijöiden määrä kasvaisi kuudesta miljoonasta kymmeneen miljoonaan.³⁹ Euroopan pilvipalvelumarkkinoiden kokonaisarvo puolestaan olisi vähän alle 45 miljardia euroa.⁴⁰ On esitetty, että data ei ole enää hyödyke vaan pääoman muoto⁴¹, joka ei enää vain kasaannu muun toiminnan sivutuotteena, vaan sitä aktiivisesti kerätään ja hankitaan kaikkialta ja kaikilta eteenpäin myytäväksi ja oman toiminnan tehostamiseksi.

Digitalisaatio ja sen synnyttämä datatalous ovat vuorovaikutuksessa muiden käynnissä olevien maailmanlaajuisen kehityskulkujen kanssa – ja kytkeytyvät siten myös keskeisiin globaaleihin haasteisiin, kuten ilmastomuutokseen ja luonnonympäristöjen tilan heikkenemiseen.

2.2. ICT-ala päästöjen lähteenä ja ympäristö- ja ilmastohaasteiden ratkaisijana

Arjessa aineettomaksi mielletty digitaaliset palvelut aiheuttavat niin energian kuin materiaalien kulutusta. Digitaalisten palvelujen edellytyksenä on ICT-infrastruktuuri, jonka rakentaminen ja käyttö kuormittaa ilmastoa ja ympäristöä.

Datan siirtäminen, prosessoiminen ja säilyttäminen eri käyttötarkoituksiin kasvaa voimakkaasti ja vaatii palvelintehoa ja sähköenergiaa. Suomessa erityisesti mobiilidatan käyttö on lisääntynyt merkittävästi – asukasmäärään suhteutettuna eniten maailmassa.^{42,43}

³⁷ Brady 2019: The challenge of Big Data and data science. Annual Review of Political Science 22.

³⁸ Prainsack 2020: The political economy of digital data: introduction to the special issue. Policy Studies.

³⁹ <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/final-results-european-data-market-study-measuring-size-and-trends-eu-data-economy>

⁴⁰ Deloitte (for the European Commission) 2017: Measuring the economic impact of cloud computing in Europe.

⁴¹ Sadowski 2019: When data is capital: Datafication, accumulation, and extraction. Big Data & Society 6.

⁴² Liikenne- ja viestintäministeriö 2018: Suomi tietoliikenneverkkojen kärkimaaksi – digitaalisen infrastruktuurin strategia 2025.

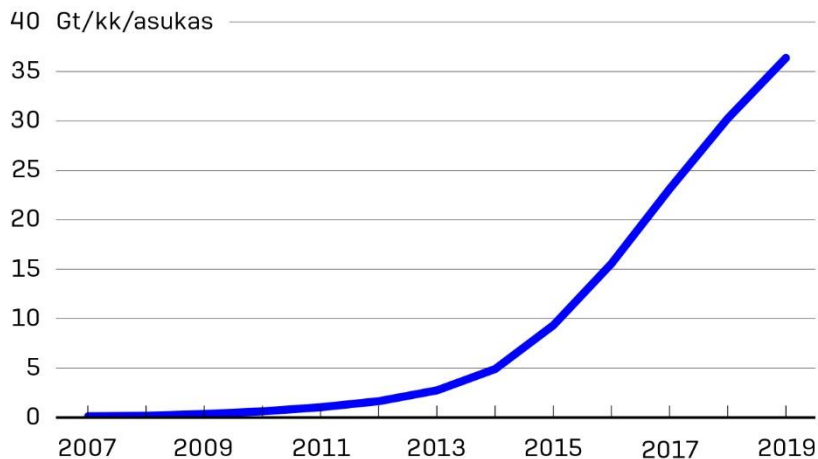
⁴³ <https://data.oecd.org/broadband/mobile-broadband-subscriptions.htm>

ICT-sektorin toimijat ja sektorin tuottamien palvelujen kuluttajat ottavat jatkuvasti uusia laitteita käyttöön. Niiden valmistaminen vaatii energiaa ja materiaaleja, mukaan luettuna harvinaisia metalleja. Raaka-aineiden otolla on monia suoria ympäristövaikutuksia kuten luonnonympäristöjen heikentymistä ja häviämistä, minkä lisäksi se on merkittävä kasvihuonekaasupäästöjen lähde. Aineiden kierrättäminen säästää neitseellisiä raaka-aineita, mutta on usein melko energiantensiivistä ja sitä haastavampaa mitä useampia materiaaleja ja pienempiä määriä laitteisiin sisältyy. Toisaalta ICT-ala on parantanut eri laitteiden energiatehokkuutta, mikä on merkittävästi alentanut käytössä olevien laitteiden energiankulutusta datayksikköä kohti.

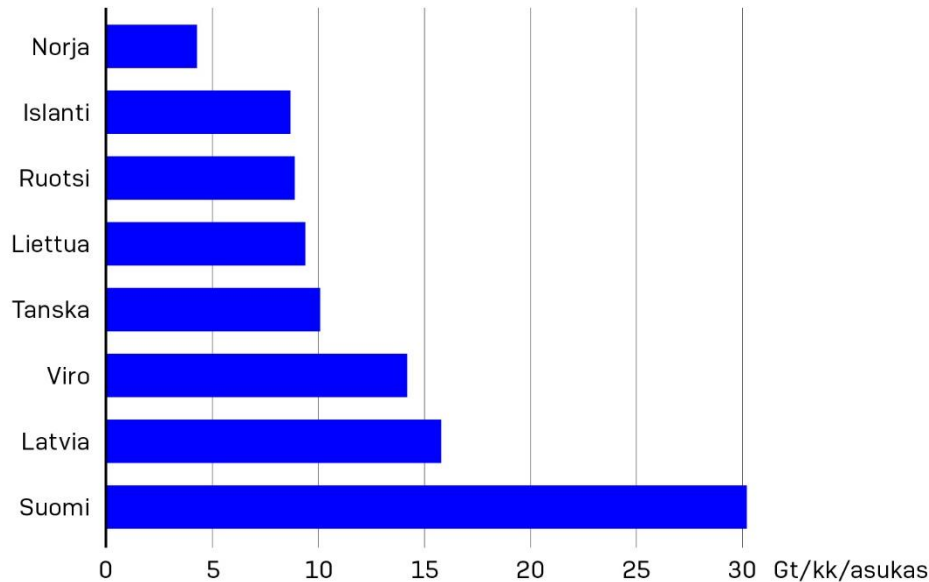
Kuva 1. Globaali internetliikenne kasvaa voimakkaasti. Lähde: Kansainvälinen energiavirasto IEA.



Kuva 2. Suomen matkaviestinverkoissa siirretään nykyisin tietoa monikymmenkertainen määrä asukasta kohden verrattuna 2010-luvun alkuun. Lähde: Liikenne- ja viestintävirasto Traficom.



Kuva 3. Suomalaiset olivat vuonna 2018 mobiilidatan käyttäjinä omassa luokassaan muihin Pohjoismaihin ja Baltiaan verrattuna. Lähde: Liikenne- ja viestintävirasto Traficom.



ICT-ratkaisuilla on iso potentiaali pienentää muiden sektorien hiilijalanjälkeä. ICT:n avulla voidaan muun muassa optimoinnin avulla vähentää energiankulutusta eri teollisuusprosesseissa, korvata fyysisiä tuotteita, edistää resurssitehokkaan ja hiilijalanjäljetään pienemmän kaupunki-infrastruktuurin luomista sekä laajempaa talouden siirtymää kohti resursseja kestävämmällä tavalla hyödyntävää kiertotaloutta. Ala voi tuottaa myös ratkaisuja ympäristön- ja luonnonsuojeluun sekä ilmastonmuutokseen sopeutumiseen, esimerkiksi parempaa varautumista tulva- ja metsäpaloriskeihin.

Kuva 4. ICT-ala kuluttaa energiaa ja materiaaleja, mutta sillä on merkittävä rooli ja potentiaali ilmasto- ja ympäristöhaasteisiin vastaamisessa.



2.2.1. Strategiatyön rajaus

Strategian tarkastelualue on Suomi, mutta kansainvälisiä esimerkkejä ja tutkimuksia käytetään relevanttein osin, mikä on luontevaa alan rajat ylittävästä luonteesta johtuen. Työssä tarkastellaan ICT-infrastruktuuria ja sen avulla tuotettuja palveluita seuraavin jaotteluin ja rajauksin.

Infrastruktuuri käsittää datakeskukset, viestintäverkot sekä päätelaitteet. Datakeskukseen, verkkoihin sekä päätelaitteisiin liittyviä keskeisiä ilmasto- ja ympäristökysymyksiä sekä keinoja haitallisten vaikutusten vähentämiseksi käsitellään tämän raportin luvuissa 3, 4 ja 5. Luvussa 6 tarkastellaan ohjelmistojen roolia.

Tämän raportin pääpaino on energiankulutuksessa ja materiaalivirroissa, jotka on aiemmissa selvityksissä identifioitu merkityksellisimmiksi ICT-alan ympäristövaikutuksiksi. Myös rakentamiseen liittyviä kysymyksiä tarkastellaan, erityisesti verkkojen osalta. Suurten datakeskusten rakentaminen vaatii yleensä aluehallintoviranomaisen ympäristöluvan, jossa otetaan huomioon muun muassa aiheutuvia päästöjä vesiin ja ilmaan sekä melua. Näitä asioita tarkastellaan lyhyesti datakeskuksia koskevassa osiossa.

Kuva 5. ICT-infrastruktuurin – datakeskusten, viestintäverkkojen ja päätelaitteiden – avulla tuotetaan palveluja yhteiskunnan eri sektoreille. Monet tuotetuista palveluista antavat mahdollisuuden vähentää ilmaston ja ympäristön kuormitusta.



ICT-ala muuttuu nopeasti teknologisen kehityksen edetessä. Uudet teknologiat voivat lisätä alan energiankulutusta voimakkaasti ja vaativat lisäksi materiaalisia panostuksia. Uusiin teknologioihin pohjautuvat sovellukset voivat myös tuottaa täysin uusia ratkaisuja haastaviin ilmasto- ja ympäristöongelmiin. Keskeisiä kehittyviä teknologioita ja niiden ympäristö- ja ilmastonäkökulmia käsitellään luvussa 7.

ICT:n tarjoamia hyötyjä ilmasto- ja ympäristökysymyksissä kuvataan luvussa 8. Positiivisista kokonaisvaikutuksista, joita ICT voi eri sektoreilla ilmastomuutoksen hillitsemiseksi tarjota, on kirjallisuudessa erilaisia arvioita. Suurimpia ihmisperäisten kasvihuonekaasupäästöjen lähteitä ovat fossiilisia polttoaineita käyttävä energiantuotanto ja liikenne. Tässä työssä päätettiin tarkastella lähemmin ICT:n tarjoamia päästövähennysmahdollisuuksia logistiikka- ja energia-alalla (luku 9).

Strategian tarkastelualasta rajattiin heti työn alussa pois ilmastomuutoksen vaikutukset ICT-alaan, esimerkiksi sään ääri-ilmiöiden vaikutus verkkojen toteutukseen ja toimintavarmuuteen, ICT-alan vaikutukset ihmisten terveyteen ja elämänlaatuun sekä sisällöntuotannon, kuten videoiden tai puheohjelmien tuotannossa syntyvät ilmasto- ja ympäristövaikutukset. Työssä päätettiin myös olla ottamatta kantaa digitaalisten palveluiden käyttäjien määrän muutoksiin: työssä ei ennusteta sitä, kuinka suuri osa väestöstä käyttää palveluita tulevaisuudessa.

Strategiaa valmistelevalle työryhmälle aloituskokouksessa marraskuussa 2019 päätettiin myös, että strategiatyössä ei tarkasteltaisi ison/yhtäkkisen yhteiskunnallisen muutoksen vaikutuksia esimerkiksi käytettäviin palveluihin. Tämä rajaus osoittautui yllättävän ajankohtaiseksi alkuvuodesta 2020. Suomessa otettiin 17.3.2020 valmiuslait käyttöön väestön suojaamiseksi koronaviruspandemialta. Tästä seuranneet laajamittaiset fyysisiä kohtaamisia tartuntariskin vuoksi rajoittavat toimet johtivat mittaavaan liikkumisen vähenemiseen ja koulun, opiskelun, työn ja asioinnin korvautumiseen pitkälti digitaalisia tietoliikenneyhteyksiä hyödyntävillä ratkaisuilla. ICT-alalla on ollut tärkeä rooli yhteiskunnan perustoimintojen mahdollistajana poikkeusoloissa. Poikkeustilanteen perusteella on kuitenkin ennen aikaista vetää johtopäätöksiä laajemmasta siirtymästä paikasta riippumattomaan työhön ja esimerkiksi fyysisen liikkumisen pysyvämmästä korvaamisesta digitaalisilla ratkaisuilla.

2.2.2. ICT-ala ja sähköenergian käyttö

Digitalisaatio on osa kehitystä, jossa yhä suurempi osuus yhteiskunnassa käytetystä energiasta kulutetaan sähköä. Sähköistyminen on välttämätöntä ilmastomuutosta kiihdyttävistä fossiilista polttoaineista luopumiseksi. Sähkön päästöttömyys käyttökohteessaan vaikuttaa myös positiivisesti ihmisten lähiympäristön ilmanlaatuun. Samalla, kun digitalisaatio parantaa toiminnan tehokkuutta, eri järjestelmien sähköistytminen kasvattaa sähkön kysyntää.

Tieto- ja viestintäteknologia-alan aiheuttamasta sähkönkulutuksen määrästä, kehityksestä ja jakaumasta on eri selvityksissä ja tutkimuksissa päädytty lähtöoletuksista ja rajoituksista riippuen toisistaan poikkeaviin tuloksiin. Joidenkin raporttien mukaan sähkönkulutus syntyy erityisesti datakeskuksissa ja verkoissa päätelaitteiden osuuden ollessa jonkin verran pienempi⁴⁴, kun taas toisissa raporteissa kuluttajalaitteiden rooli korostuu⁴⁵.

⁴⁴ Morley ym. 2018: Digitalisation, energy and data demand: The impact of Internet traffic on overall and peak electricity consumption. Energy Research & Social Science 38.

⁴⁵ Malmodin & Lunden 2018: The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. Sustainability.

Alan kokonaissähkökulutuksen on arvioitu viime vuosina julkaistuissa tutkimusartikkeleissa olevan noin 7–10 %.^{42,46,47} Alan kasvihuonekaasupäästöjen osuus maailman kasvikaasupäästöistä on pienempi kuin sähkökulutuksen osalta, globaalisti arviolta korkeintaan 3–5 %.^{44,48}

Tulevaisuuden kehityksestä on erilaisia arvioita. Digitaalisten palvelujen määrän, käyttäjien, verkkoihin kytkettyjen laitteiden ja palvelujen dataintensiivisyyden kasvu on voimakasta. Joidenkin arvioiden mukaan alan energiankulutus voisi moninkertaistua seuraavan kymmenen vuoden aikana.⁴⁹ ICT-ala on kyennyt jatkuvasti parantamaan laitteiden ja teknologioiden energiatehokkuutta, eikä toistaiseksi ICT-alan energiankäytön määrä ei ole kasvanut samassa suhteessa kuin datan määrä. Monet myös odottavat, että energiatehokkuuden kehitys pystyy myös jatkossa vastaamaan lisääntyvään kasvuun.^{50,51}

Maakohtaiset koko ICT-alan energiankulutusta koskevat selvitykset ovat harvassa. Saksassa on tehty joitakin osittaisia arvioita. Sitra on keväällä 2020 toiminut rahoittajana Etlan selvityksessä, jossa arvioidaan alan energiankulutusta ja sen kehitystä Suomessa. Teknologiateollisuuden vähähiilisyystiekartassa, jota on valmisteltu työ- ja elinkeinoministeriön koordinoimana, ICT-alaa tarkastellaan yhtenä klusterina palvelualan kanssa ja esitetään skenaarioita alan sähkökulutuksen ja päästöjen kehityksestä.

Etlan selvityksessä⁵², jonka rahoittajana toimii Sitra, alan sähkökäyttöä tarkastellaan Tilastokeskuksen toimialaluokituksen perusteella. Sen mukaisesti vuonna 2017 informaatiosektoriin kuuluvat toimialat⁵³ olisivat kuluttaneet vuonna 2017 alle 1 TWh (noin 1 %) kokonaissähkökulutuksesta Suomessa. Tämä luku ei sisällä muiden toimialojen sähkökäyttöä, joka liittyy ICT-verkkojen ja -laitteiden käyttöön ja ylläpitoon. Myös kuluttajien päätelaitteiden sähkökäyttö kotona on rajattu tarkastelun ulkopuolelle.

Afryn (ent. Pöyry) Teknologiateollisuudelle laatimassa vähähiilitiekarttaraportissa (15.5.2020 versio) tarkastellaan ICT:n osalta erityisesti datakeskuksia ja viestintäverkkoja. Raportin kolmessa skenaariossa tarkastellaan alan sähkökulutuksen ja päästöjen näkymää, joka riippuu alan energiatehokkuutta parantavista teknologisista murrok-

⁴⁶ Andrae 2020: Hypotheses for primary energy use, electricity use and CO₂ emissions of global computing and its shares of the total between 2020 and 2030. WSEAS Transactions on power systems.

⁴⁷ Jones 2018: How to Stop Data Centers from Gobbling up the world's electricity. Nature 561.

⁴⁸ Belkhir & Elmeligi 2018: Assessing Global ICT emissions footprint. Trends to 2040 and recommendations. Journal of Cleaner Production.

⁴⁹ Andrae & Edler 2015: On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030.

⁵⁰ Ericsson 2020. A quick guide to your digital footprint.

⁵¹ Masanet ym. 2020: Recalibrating global data center energy-use estimates. Science 28.

⁵² Hiekkänen, Seppälä & Ylhäinen 2020: Informaatiosektorin energian- ja sähkökäyttö Suomessa. ETLA Raportti No. 104, luonnos 19.5.2020.

⁵³ TOL 26 Tietokoneiden sekä elektronisten ja optisten tuotteiden valmistus, 58–63 Informaatio ja viestintä. https://www.stat.fi/til/tyti/2018/13/tyti_2018_13_2019-04-11_kat_007_fi.html

sista ja kulutetun sähkön ominaispäästöjen kehityksestä (ks. myös 2.2.3). ICT-alan liikevaihdon, datakeskusten kapasiteetin ja tiedonsiirron volyymien oletetaan tarkastelussa edelleen jatkuvasti kasvavan nykyvauhtia.

Kaiken kaikkiaan ICT:n osuus sekä teknologiateollisuuden kasvihuonekaasupäästöistä että energiankulutuksesta on pieni. Teknologiateollisuuden eri sektoreista suurimmat kasvihuonekaasupäästöt aiheutuvat metallinjalostuksesta, joka käyttää myös valtaosan toimialan tarvitsemasta energiasta. Afryn/Teknologiateollisuuden raportissa tarkastelluissa skenaarioissa ICT-alan vuotuinen sähkönkulutus kasvaisi noin kahdesta terawattitunnista vuonna 2020 (noin 2 % Suomen sähkönkulutuksesta) noin viiteen terawattituntiin vuoteen 2050 mennessä.

Mikäli Afryn raportin arvioon lisättäisiin päätelaitteet, voitaisiin hyvin karkeasti arvioiden noin kaksinkertaistaa⁵⁴ tämä luku. Tällöin tultaisiin noin neljään terawattituntiin, joka olisi alle viisi prosenttia kokonaissähkönkulutuksesta Suomessa. Tähän lukuun on kuitenkin suhtauduttava suuntaa-antavana.

Energiakulutuksen hillintään on Afryn raportissa datakeskuksissa sekä ICT-alalla yleisesti tunnistettu useita eri keinoja, kuten datakeskusten mitoitus ja palvelinkapasiteetin optimointi sekä energiatehokkaiden tiedonsiirtotekniikoiden ja tekoälyalgoritmien käyttö. Niiden kehittäminen edellyttää kuitenkin merkittäviä tutkimus- ja kehityspanostuksia.

ICT-ala kytkeytyy sähköntuotantoon ja laajemmin energiantuotantoon paitsi sähkön käyttäjänä myös energiankäytön optimoinnin mahdollistajana. Tuuli- ja aurinkovoiman tuotanto vaihtelee ulkoisten olosuhteiden vaikutuksesta (tuulisuus, pilvisuus, vuorokauden aikainen valoisuus), ja tuuli- ja aurinkotuotannon osuuden lisääntyminen energiantuotannossa tekee siten haasteelliseksi sähköjärjestelmän pitämisen tasapainossa ja vaatii kysynnän sopeuttamista muuttuvaan tarjontaan. Toimivia digitaalisia ratkaisuja tarvitaan, jotta sähkön kysyntäjoustolla voidaan tasapainottaa järjestelmiä. Näitä kysymyksiä tarkastellaan lähemmin luvussa 9.2.

2.2.3. Sähköenergian kulutuksesta kasvihuonekaasupäästöihin

Ilmastonmuutoksen kannalta on olennaista, miten kulutettu sähkö on tuotettu. Kerroin, jolla käytetty sähkö muutetaan hiilidioksidipäästöiksi riippuu kunkin maan sähköntuotannon rakenteesta. Maailmanlaajuisesti fossiililla polttoaineilla on vielä suuri rooli sähköntuotannossa. Noin 25 % sähköstä tulee uusiutuvista lähteistä.⁵⁵

Kansainvälisesti vertailtuna Suomessa kulutettu sähkö on verrattain hiilivapaata. Vuonna 2019 Suomessa kulutettiin sähköä 86 terawattituntia. Sähkönenergian lähteet olivat seuraavat: nettotuonti 23 %, uusiutuvat (vesi, tuuli, puuperäiset) 35 %, ydinvoima 27 %, fossiiliset polttoaineet 15 % (kivihiili ja maakaasu 11 %, turve 3 % sekä jäte

⁵⁴ Tarkkaa arviota ei tämän työn puitteissa ole tehty. Kansainvälisissä lähteissä esiintyy lukuja, joissa, päätelaitteiden kulutus on noin 0,5–2 kertaa verkkojen ja datakeskusten kulutus yhteensä, rajauksista riippuen.

⁵⁵ <https://www.iea.org/commentaries/empowering-electricity-consumers-to-lower-their-carbon-footprint>

1 %).⁵⁶ Elinkaaren aikaisilta kasvihuonekaasupäästöiltään ydinvoima rinnastuu uusiutuviin energianlähteisiin⁵⁷, turve puolestaan fossiilisiin.

Tuodun sähkön lähteistä saadaan suuntaa-antavaa tietoa tarkastelemalla tuontimaiden sähköntuotannon rakennetta. Sähköä tuodaan Pohjoismaista (erityisesti Ruotsista ja Norjasta) ja Venäjältä. Norjassa (tuonti Suomeen 0,2 TWh vuonna 2019⁵⁸) ja Ruotsissa (16,3 TWh) sähköntuotanto on Suomea fossiilittomampaa^{59,60}, Venäjällä (7,5 TWh) kaksi kolmasosaa sähköstä tuotetaan fossiililla polttoaineilla. Ydinvoima on tavallinen sähkön lähde muun muassa Suomen lähialueilla.⁶¹ Myös Virosta tuodaan jonkin verran sähköä Suomeen, mutta Suomesta viedään sähköä Viroon enemmän kuin sieltä tuodaan, jolloin Virosta tuodun sähkön päästöt eivät vaikuta Suomen alueelta tuleviksi laskettaviin päästöihin.

ICT-alan yritykset voivat energiatehokkuuden parantamisen lisäksi pienentää omaa hiilijalanjälkeään hankkimalla hiilettömällä lähteillä tuotettua sähköä. Esimerkiksi Suomen kolme suurinta teleyritystä tekevät kukin osana vastuullisuusraportointiaan ympäristövastuuraportin, joista käy ilmi koko konsernin sähkönkulutus. Raporttien mukaan näiden kolmen toimijan hankkima sähkö on pääosin hiilivapaata. Teleyritysten ympäristövastuuraporttien sisällöistä on kerrottu lähemmin luvussa 4.3.2. ICT-kuluttajalaitteiden ja muiden teleyritysten ulkopuolella käytössä olevien ICT-laitteiden suoraan sähkönkulutuksen päästöihin teleyritysten sähkönhankinta ei luonnollisestikaan vaikuta.

Jos ICT-yritysten ostama uusiutuva sähkö tuotetaan laitoksilla, joita ei muuten rakennettaisi (PPA, power purchase agreement), voi tämän uusiutuvan sähköntuotannon katsoa olevan lisäistä. Esimerkiksi Google on tehnyt pitkäaikaisia sähkönostosopimuksia tuulivoimapuistojen kanssa Haminan palvelinkeskuksen sähkönhankintaa varten. Tällaisten sopimuksen tekemiseksi on toiminnan mittakaavan ainakin nykyisellään oltava melko suuri, kuten hyperskaalan datakeskuksella on. Ylipäätään tuulivoiman lisärakentaminen Suomessa jatkuu voimakkaana johtuen sen kustannustehokkuudesta, eikä uusiutuvan sähkön riittäminen esimerkiksi datakeskusten tarpeisiin näytä olevan nousemassa haasteeksi.

ICT-alan (sis. datakeskukset ja verkot) päästöiksi on Afryn teknologiateollisuudelle tekemässä vähähiilitieraportissa arvioitu nykytilanteessa alle 0,2 Mt hiilidioksidiekvivalentteina vuodessa, mikä vastaa noin kolmea prosenttia toimialan kokonaispäästöistä, Suomen kasvihuonekaasupäästöistä tämä olisi alle 0,5 prosenttia. Edelleen Afryn arvion mukaan ICT-sektorin voimakkaasta kasvusta huolimatta päästöt pienenevät entisestään koko tiekartassa tarkastellun, vuoteen 2050 ulottuvan jakson aikana. Tämä

⁵⁶ <https://energia.fi/julkaisut/tilastot/sahkotilastot>

⁵⁷ <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/ed54e5ef-47f6-41b9-bb5d-8d7b72323571/ydinvoima.html>

⁵⁸ Fingrid 2019: Siirtojen hallinta.

⁵⁹ <https://www.ekonomifakta.se/Fakta/Energi/Energibalans-internationellt/Elproduktion-med-fossila-branslen/>

⁶⁰ <https://annualreport.fingrid.fi/liiketoiminta/sahkojarjestelma.html>

⁶¹ <https://www.svkk.fi/venla-2015-2018/uutta-virtaa-uusiutuvasta-energiasta/>

johtuu raportissa siitä, että ICT-alan energiatehokkuus paranee ennakoitujen teknologisten murrosten kautta, samalla kun käytetyn sähkön ominaispäästöt lähestyvät nollaa jakson lopulla.

Kussakin maassa käytetyn sähkön ilmastovaikutus kokonaisuudessaan määräytyy sähköntuotannon rakenteen perusteella – jos osa aloista panostaa vihreän sähkön hankintaan, fossiilisilla tai niihin verrattavilla polttoaineilla tuotettu sähkö käytetään muilla aloilla. Sähkönkulutuksen kasvu ei EU-alueella kuitenkaan lisää päästöjä aivan suorassa suhteessa, sillä EU:ssa sähköntuotanto on päästökaupan piirissä. Eri alojen sähköistyessä herää kysymys siitä, mitä sähköstä – erityisesti vihreästä sähköstä – täytyy tulevaisuudessa maksaa. Energiatehokkuus kokonaissähkönkulutuksen kasvun hillitsijänä on edelleen perusteltu tavoite. Suomi on myös sitoutunut tavoitteeseen, ettei loppuenergian kulutus kokonaisuudessaan ylitä 290 TWh:n tasoa.⁶² Pidemmällä aikavälillä yhteiskuntien laajasti sähköistyessä nousevat esiin myös kysymykset uusiutuvan energian ja yhteiskunnan sähköistymisen kasvun rajallisuudesta raaka-aineiden suhteen, esimerkiksi kriittisten maametallien riittävyys ja sijainti on nähty haasteena.⁶³

ICT-alan osalta kokonaiskuvan saamista yhden maan sisällä käytettyjen palvelujen päästöistä mutkistaa se, että datavirrat ylittävät rajoja ja Suomessakin käytetyt palvelut voivat aktivoida datakeskuksia sähköntuotannoltaan varsin erilaisissa maissa.

2.3. Kuluttajien rooli

ICT-sektorin ilmasto- ja ympäristövaikutuksiin vaikuttavat niin kuluttajien, yritysten kuin julkishallinnon tekemät ICT:tä koskevat ratkaisut. Kuluttajakäyttäytyminen vaikuttaa merkittävästi siihen, millaiseksi kokonaiskuva muodostuu. Suomessa esimerkiksi matkaviestinverkossa siirtyvästä tiedonsiirtomäärästä arviolta 90 prosenttia on yksityishenkilöiden liittymien tuottamaa tiedonsiirtoa.⁶⁴ Kiinteän laajakaistaverkon tiedonsiirtomäärästä ei ole mahdollisuutta saada yhtä selkeää ja kattavaa kuvaa.

Suomessa matkaviestinverkossa siirretään eurooppalaisessa ja globaalissa vertailussa runsaasti dataa.⁶⁵ Vuoden 2019 toisella puoliskolla matkaviestinverkossa siirrettiin tietoa 38 gigatavua kuukaudessa asukasta kohden. Tiedonsiirtomäärä kasvaa noin 20 prosenttia vuosittain. Mobiilitiedonsiirtokäyttö jakautuu kuitenkin epätasaisesti käyttäjien kesken: keskimääräisestä tiedonsiirtoliittymästä siirrettiin dataa syksyn 2019 aikana alle 10 gigatavua kuussa.⁶⁶

⁶² Työ- ja elinkeinoministeriö 2019: Suomen yhdenmätty energia- ja ilmastosuunnitelma.

⁶³ Viebahn ym. 2015: Assessing the need for critical minerals to shift the German energy system towards a high proportion of renewables. Renewable and Sustainable Energy Reviews 49.

⁶⁴ Liikenne- ja viestintäviraston suurimmille teleyrityksille tehty tiedonkeruu, kevät 2020.

⁶⁵ <https://tefficient.com/wp-content/uploads/2019/09/tefficient-industry-analysis-3-2019-mobile-data-usage-and-revenue-1H-2019-per-operator-5-Sep.pdf>

⁶⁶ Liikenne- ja viestintävirasto: Viestintäpalveluiden tilastotaulukko. Päivitetty 18.3.2020.

Suomen suurta mobiilitiedonsiirtomäärää selittävät muun muassa laajasti käytössä olevat mobiililaajakaistaliittymät, joita käytetään kiinteän laajakaistaliittymän tavoin vain tiedonsiirtoon. Mobiililaajakaistaliittymien tiedonsiirto kattoi 56 prosenttia syksyn 2019 mobiilitiedonsiirrosta. Matkaviestinverkkoon perustuvien liittymien käytön kiinteän laajakaistan sijaan mahdollistaa liittymäsopimuksiin useimmiten kuuluva rajaton tiedonsiirto. Mobiililaajakaistaliittymiä oli vuoden 2019 lopussa reilu 2 miljoonaa kappaletta, joista lähes 80 prosenttia oli käytössä kotitalouksissa ja näistä lähes kaikki olivat käytöltään rajoittamattomia.⁶⁷

Kattavat matkaviestinverkot ja rajoittamattomat liittymät ovat johtaneet siihen, että suomalaisista kotitalouksista 41 prosentilla on käytössään vain matkaviestinverkkoon perustuva internetliittymä, joko matkapuhelimen tai esimerkiksi 4G-modeemin kautta. Hieman yli puolella kotitalouksista on käytössään kiinteä laajakaistayhteys ja jokin matkaviestinverkon yhteys.⁶⁸

Globaalista internetliikenteestä noin 78 prosentin on arvioitu vuonna 2020 olevan erilaisten videoiden lataamista ja lähettämistä, ja tämän osuuden ennustetaan kasvavan 82 prosenttiin vuoteen 2022 mennessä. Luku ei sisällä pelaamista, jonka osuuden arvioidaan kahden vuoden kuluttua olevan 4 prosenttia.⁶⁹ Arvioitu luku sisältää esimerkiksi mainosten aiheuttaman videoliikenteen, jonka ilmasto- ja ympäristövaikutuksia on myös arvioitu⁷⁰, mutta enemmistö liikenteestä on todennäköisimmin kuluttajien vapaa-ajan videotiedonsiirtoa. Suoratoistopalvelujen tuottamisen energiankulutus kasvaa nopeasti: esimerkiksi Netflixin globaali kokonaisenergiankulutus vuonna 2019 oli 451 gigawattituntia, joka oli 84 prosenttia enemmän kuin yrityksen kokonaisenergiankulutus vuotta aiemmin.⁷¹ Vaikka videotoistopalvelut ovatkin lähtökohtaisesti päästöttömämpiä kuin DVD- tai Blu-ray -levyt, muodostavat digitaaliset videotoistopalvelut enemmän päästöjä, jos videoiden katselu huomattavasti kasvaa DVD/Blu-ray -katseluun nähden.^{72,73}

Videoiden jälkeen toiseksi suurin tiedonsiirron lähde internetissä ovat erilaiset web-palvelut, kuten uutissivustot ja tietopalvelut, toisin sanoen perinteinen nettiseläus.⁷⁴ Varsinainen informaation määrä internetin sivustoilla ei kuitenkaan ole merkittävästi kasvanut, vaan nettisivujen ulkoasu, erilaisten skriptien määrä ja mainokset ovat kasvattaneet sisältöjä.

⁶⁷ Liikenne- ja viestintävirasto: Viestintäpalveluiden tilastotaulukko. Päivitetty 18.3.2020.

⁶⁸ Liikenne- ja viestintävirasto: Laajakaistayhteyksien levinneisyys kotitalouksissa. Päivitetty 3.4.2020.

⁶⁹ https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/network-intelligence/service-provider/digital-transformation/knowledge-network-webinars/pdfs/1213-business-services-ckn.pdf

⁷⁰ Esim. Pärssinen ym., 2018: Environmental impact assessment of online advertising. Environmental Impact Assessment Review 73.

⁷¹ Netflix 2020: Environmental Social Governance 2019 Sustainability Accounting Standards Board (SASB) Report.

⁷² Aditya ym. 2019: Environmental Impacts of Shifting from Movie Disc Media to Movie Streaming: Case Study and Sensitivity Analysis. 26th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference.

⁷³ Brennan & Devine 2020: Cost of music. Popular Music.

⁷⁴ Http Archive 2020: Time series of Total Kilobytes.

Suomessa mobiiliverkkojen kuormitus on suurimmillaan toimistoajan ulkopuolella iltapäivään.⁷⁵ Suoratoistopalvelujen (esimerkiksi mtv, Ruutu, Yle Areena, Netflix, HBO, Viaplay, Amazon, YouTube) käyttö on lisääntynyt nopeasti. Suomalaisista kuluttajista 84 prosenttia katsoo TV-ohjelmia tai videoita maksuttomista internetpalveluista ja vajaa puolet kertoo käyttäneensä maksullisia suoratoistopalveluita. Samaan aikaan vähintään viikoittain internetin puhepalveluita käyttää noin 40 prosenttia suomalaisista.^{76,77}

Sosiaalisen median palveluita, pikaviestinpalveluita ja internetin puhepalveluita käytetään yleisimmin matkapuhelimella, kun taas TV-ohjelmien ja elokuvien katselu sekä pelaaminen ovat yleisempiä kotona internetyhteydellä. Lyhyiden videoklippien katsominen esimerkiksi YouTubea on yhtä yleistä kummallakin tavalla. Suomalaisista 49 prosenttia katsoo kotona TV-ohjelmia tai elokuvia internetistä vähintään viikoittain. Tästä joukosta vajaa puolet katsoo näitä myös matkapuhelimeltaan. Loput eivät katso TV-ohjelmia tai elokuvia matkapuhelimella, vaan ainoastaan kotona internetyhteydellä.^{78,79}

Kuluttajien videotiedonsiirtomäärä kasvaa lisääntyvän käytön myötä, minkä mahdollistaa alati paraneva verkkoinfrastruktuuri ja kasvava verkon kapasiteetti. Kapasiteetin kasvaessa se otetaan käyttöön nopeasti esimerkiksi kuvanlaatuun paranemisen kautta, ja onkin arvioitu, että vuonna 2023 globaalisti käytössä olevista TV-laitteista 66 prosenttia pystyy toistamaan hyvin tarkkaa 4K-kuvaa.⁸⁰ Mitä suuremmalla ruudulla ja mitä tarkemmalla kuvanlaadulla katsotaan, sitä suuremmaksi videotiedonsiirtomäärä (laajakaistaverkoissa) kertyy. Yli puolet suomalaisista katsoo TV- ja videosisältöjä vähintään 36-tuumaiselta ruudulta.⁸¹ Kasvavasta kuvan tarkkuudesta kertoo muun muassa se, että 4K-kuvaa tukevien UHD-televisioiden myyntimäärä vuonna 2019 kasvoi Suomessa 14 prosenttia edelliseen vuoteen verrattuna.⁸²

Kotitalouksien asumiseen kului Suomessa kaikkiaan vajaa 66 TWh energiaa vuonna 2018. Laitteiden osuus koko asumisen energiasta oli vajaa 13 prosenttia.^{83,84} Tästä reilu yhdeksän prosenttiyksikköä kului muissa sähkölaitteissa, joihin kuuluvat muun muassa ruoan valmistuksen pienlaitteet, kylmälaitteet, pesu- ja kuivauskoneet, televisiot ja tietokoneet laitteineen, hissit ja autojen lämmitys. Isossa-Britanniassa tehdyssä arviossa kotitalouksien tietokoneen ja muiden elektroniikkalaitteiden käyttö kuluttaa

⁷⁵ VTT: Mobiilimittari.

⁷⁶ Liikenne- ja viestintävirasto 2019: Viestintäpalvelujen kuluttajatutkimus 2019. Päivitetty 29.5.2019.

⁷⁷ Liikenne ja viestintäministeriö 2018: Suomi tietoliikenneverkkojen kärkimaaksi – digitaalisen infrastruktuurin strategia 2025.

⁷⁸ Liikenne- ja viestintävirasto: Viestintäpalvelujen kuluttajatutkimus 2019. Päivitetty 29.5.2019.

⁷⁹ Kotona tapahtuva käyttö voi tapahtua matkaviestinverkossa tai kiinteässä verkossa ja voi myös tapahtua matkapuhelimella tai sen verkkoa hyödyntämällä.

⁸⁰ <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>

⁸¹ Liikenne- ja viestintävirasto 2019: Viestintäpalvelujen kuluttajatutkimus 2019. Päivitetty 29.5.2019.

⁸² <https://gotech.fi/2020/02/03/kodintekniikan-kauppa-kasvoi-37-prosenttia-vuonna-2019/>

⁸³ http://www.stat.fi/tup/suoluk/suoluk_energia.html#asuminen

⁸⁴ http://www.stat.fi/til/asen/2018/asen_2018_2019-11-21_tie_001_fi.html

noin 20 prosenttia muusta kuin lämmitykseen menevästä sähkönkulutuksesta. Pelkäs-tään elektroniikkalaitteiden valmiustilan on laskettu muodostavan jopa 10 prosenttia kotitalouksien energiankulutuksesta.⁸⁵ Päätelaitteisiin liittyviä materiaa-livirtoja ja niiden ympäristövaikutuksia tarkastellaan luvussa 5.

Kotitalouksien kulutus kokonaisuudessaan aiheuttaa 2/3 Suomen kasvihuonekaasu-päästöistä. Liikkuminen, asuminen ja energia ovat suurimmat lähteet, sen jälkeen elin-tarvikkeet ja muut tavarat ja palvelut.⁸⁶ ICT:hen liittyvää suomalaisen kulutuksen pääs-tövaikutusta ei ole kattavalla tavalla eritelty. Esimerkiksi päätelaitteiden käytöstä johtu-valle energiankulutukselle saadaan erilaisia arvoja riippuen siitä, huomioidaanko vain laitteen suora kulutus vai otetaanko mukaan myös verkoissa ja datakeskuksissa aiheu-tuva kulutus. Päästökertoimeen puolestaan vaikuttaa, se, miten käytetyn palvelujen tuottamiseen tarvittava liikenne on järjestetty eli pysytäänkö Suomen rajojen sisäpu-lella.

ICT:hen liittyvä kulutus ja päästöt voivat vaihdella merkittävästikin yksilöiden välillä riip-puen laitteiden äärellä vietetystä ajasta ja käytetyistä laitteista (esimerkiksi suuret näy-töt ja tehokkaat pelikoneet) ja siitä millaisia verkkoja ja datakeskuksia käytetään. Ruot-salaisen esimerkkilaskelman mukaan henkilön ICT:hen liittyvät päästöt voivat vaihdella 0,6–7 prosentin välillä keskimääräisestä yksityishenkilön hiilijalanjäljestä.⁸⁷

Kuluttajat kaipaavat ICT-palveluiden hiilijalanjäljestä enemmän tietoa. Internetin käytön negatiivisista ilmasto- ja ympäristövaikutuksista ei kuluttajien keskuudessa pääosin olla tietoisia tai ollaan tietoisia vain päätelaitteiden vaikutuksista.⁸⁸ Eurooppalaisista 28 pro-senttia sanoo, että tieto esimerkiksi suoratoistopalveluiden hiilijalanjäljestä vaikuttaisi heidän käyttökseen. Suomalaisista hieman pienempi joukko, 24 prosenttia, uskoo tä-män vaikuttavan käyttökseen.⁸⁹

Tieto kestävästä ICT-laitteiden ja -palveluiden kulutuksesta voi vaikuttaa kuluttajien toi-mintaan, koska tällöin asian nähdään olevan omissa käsissä.⁹⁰ Toisaalta internetin kaikki elämäalueet lävistävä luonne tekee käyttäytymisen muutoksesta hankalaa. In-ternetin käytön negatiiviset ympäristövaikutukset nähdään yhtäältä valtavan mittakaa-van asiana, ja toisaalta ei haluta luopua eduista, joita uudet teknologiat ovat tuoneet. Jos ehdotetut toimenpiteet koetaan liian rajoittavina, voi herätä skeptisyys koko asiaa ja toimenpiteiden tehokkuutta kohtaan.

⁸⁵ Pothitou ym. 2017: ICT entertainment appliances' impact on domestic electricity con-sumption. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

⁸⁶ Nissinen & Savolainen 2019: Julkisten hankintojen ja kotitalouksien kulutuksen hiili-jalanjälki ja luonnonvarojen käyttö – ENVIMAT-mallinnuksen tuloksia. Suomen ympäristökeskus.

⁸⁷ Ericsson 2020: Backgorund report to "A guide to your digital impact".

⁸⁸ Elgaaied-Gambier ym. 2020: Cutting the Internet's Environmental Footprint: An Anal-ysis of Consumers' Self-Attribution of Responsibility. Journal of Interactive Marketing.

⁸⁹ <https://ec.europa.eu/commfrontoffice/publicopinion/index.cfm/survey/getsur-veydetail/instruments/special/surveyky/2228>

⁹⁰ Leung 2018: A Study of Perception Factors that Affect Green IT Behavior. Twenty-fourth Americas Conference on Information Systems.

Kuluttajat myös luottavat voimakkaasti yritysten kykyyn löytää uudet toimivat ratkaisut, jotka tuottavat vähemmän päästöjä, mutta eivät vähennä palveluiden toimivuutta.⁹¹ Tämä luottamus yritysten kehitystyöhön on sikäli merkityksellinen havainto, että palvelun tai tuotteen hankinnan hinta ja helppous ovat tärkeitä kuluttajien valintoja ohjaavia tekijöitä. Myös ICT-palvelujen ja laitteiden tapauksessa siis ympäristöystävällisempiä valintoja tehtäisiin luultavasti helpommin, jos niiden etsimiseen tai hankkimiseen ei tarvitse käyttää ylimääräistä vaivaa tai rahaa.

⁹¹ Elgaaied-Gambier ym. 2020: Cutting the Internet's Environmental Footprint: An Analysis of Consumers' Self-Attribution of Responsibility. Journal of Interactive Marketing.

3. Datakeskukset

3.1. Datakeskukset ja pilvipalvelut Suomessa

Suomessa on niin yksityisen kuin julkisen sektorin (valtio, kunnat, sairaanhoitopiirit) omistuksessa ja operoinnissa olevia datakeskuksia. Viime vuosien kehitystrendi on ollut omista datakeskuksista ulkoistettuihin datakeskuspalveluihin ja pilvipalveluihin siirtyminen niin yrityksissä kuin julkisella sektorilla. Vuonna 2012 pienimmätkin laittilat (alle 0,1 MW teho) huomioivan selvityksen mukaan Suomessa oli jopa 2800 palvelinkeskusta.⁹²

Datakeskusten keskittymiskehitykseen liittyy datakeskusten koon kasvu ja yksityisten toimijoiden osuuden kasvu datakeskusten omistajista ja operoijista. Vuonna 2010 tavallinen datakeskusten sähköteho maailmalla oli 2–5 MW, kuin nykyisin yleinen teho on 10–50 MW.

Tietoja datakeskuksista ja IT-palveluntarjoajista kokoavan Cloudscene-sivuston listalla huhtikuun 2020 alussa Suomessa oli 36 yksityisomisteista datakeskusta. 2010-luvun kuluessa Suomen valtion omia konesaleja vähennetty 120:sta 30:een ja lähivuosina määrä vähentyy edelleen.⁹³ Kunnissa datakeskukset on usein ulkoistettu, etenkin isommissa kaupungeissa näin on jo tehty ja pienemmissä kunnissa kiinnostus siirtyä palveluun on lisääntynyt. Tähän on syynä sekä tarve suurempaan ja tehokkaampaan kapasiteettiin, monimutkaistuva digitaalinen ympäristö sekä palvelumarkkinoiden kehittyminen.⁹⁴ Julkisella sektorilla että yrityksissä pidettäneen kuitenkin myös jatkossa jonkin verran datakeskuskapasiteettia omassa hallinnassa tietoturvaan ja huoltovarmuuteen liittyvistä syistä.

Pilvipalvelut ovat kasvattaneet nopeasti suosioitaan Suomessa ja muissa Pohjoismaissa. 85 prosenttia suomalaisista yrityksistä ja julkisyhteisöistä käytti pilvipalveluita vuonna 2017.⁹⁵ Julkisiin tai yksityisiin pilvipalveluihin siirtymiseen kannustavat usein kustannussäästöt, mutta esimerkiksi Tiedon (nyk. TietoEVERY) vuoden 2019 *Cloud Maturity Index* –tutkimuksen noin kolmestasadasta norjalaisesta, ruotsalaisesta ja suomalaisesta julkisesta ja yksityisestä toimijasta noin puolet otti pilvistrategiassaan huomioon myös ympäristökysymykset, kuten energiankulutuksen tai CO₂-päästöt.

Etlä⁹⁶ havainnollistaa, miten pilvipalveluiden käytön kasvu näkyy globaalin IP-liikenteen (Internet Protocol) kasvussa: IP-liikenne on kasvanut vuodesta 2006 vuoteen 2011 yli

⁹² MarketVisio Gartner, 2012: Konesalit Suomessa 2012.

⁹³ Valtori.

⁹⁴ Kuntaliitto.

⁹⁵ <https://www.tieto.com/fi/uutishuone/kaikki-uutiset-ja-tiedotteet/yritysuutiset/2017/06/pilvipalveluissa-on-merkittava-saastopotentiaali-mutta-harva-hyodyntaasita-taydella-teholla/>

⁹⁶ Hiekkänen, Seppälä & Ylhäinen 2020: Informaatiosektorin energian- ja sähkönkäyttö Suomessa. ETLA Raportti No. 104, luonnos 19.5.2020.

seitsenkertaiseksi ja vuodesta 2011 vuoteen 2017 nelinkertaiseksi. Yritysten omista datakeskuksista on siirrytty pilviarkkitehtuureihin, samoin kuluttajien palveluiden käyttö on siirtynyt kodin päätelaitteilta näihin pilviarkkitehtuureihin. Samalla kiinteät kustannukset (omat investoinnit) muuttuvat muuttuviksi kustannuksiksi (palveluksi). Pilvipalvelumalleista lisää luvussa 6.2.

Taulukko 1. Toimintamallista riippuen datakeskus voi palvella sisäisiä tai ulkoisia käyttäjiä tai molempia. Kaupallisia datakeskuspalveluja tarjoavat Suomessa niin kotimaiset kuin kansainväliset yritykset.

Toimijoiden sisäistä käyttöön varten ylläpitämät datakeskukset		Kaupalliset datakeskuspalvelut julkisen ja yksityisen sektorin asiakkaille	
julkisen sektorin datakeskukset	valtio	pilvipalvelujen tarjoajien datakeskukset, joissa palvelimet palvelujen tarjoajan omia	
	kunnat ja alueelliset toimijat		
yritysten datakeskukset		co-location palvelut, jolloin palveluntarjoajan omien palvelimien lisäksi tilassa asiakkaan omistamia palvelimia	teleyritykset tyypillisesti co-location tilan tarjoajia: datakeskusten kapasiteettia käytetään yritysten sisäisiin tarpeisiin ja myydään ulkopuolisille asiakkaille

Systemaattisesti kerättyä, julkisesti saatavilla olevaa dataa Suomessa sijaitsevien datakeskusten IT- ja sähkötehoista ja sähköenergiankulutuksesta ei ole. Vastaava tilanne ei koske vain Suomea. Datakeskusten sähköenergian kulutuksen seuranta on puutteellista ja tiedot sähköenergian kulutuksesta pidetään yleensä poissa julkisuudesta.⁹⁷ Samaan aikaan datakeskusten energiankulutus ja sen kehitys herättää suurta kiinnostusta ja energiankulutuksen odotetaan kasvavan. Esimerkiksi Andraen⁹⁸ tuore arvio globaalista datakeskusten sähkökulutuksesta on noin 300 TWh vuonna 2020 ja lähes 800 TWh vuonna 2030. Korkeampiakin arvoja on esitetty.

EU:n tasolla Euroopan komission yhteinen tutkimuskeskus JRC on perustanut datakeskusten menettelyohje -aloitteen (Data Centers Code of Conduct) edistämään eurooppalaisten datakeskusten energiatehokkuutta ja seuraamaan niiden energiankulu-

⁹⁷ Avgerinou ym. 2017: Trends in Data Centre Energy Consumption under the European Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency. Energies.

⁹⁸ Andrae 2020: Hypotheses for primary energy use, electricity use and CO₂ emissions of global computing and its shares of the total between 2020 and 2030. WSEAS Transactions on power systems.

tusta. JRC:n tietopankki perustuu aloitteeseen vapaaehtoisesti liittyneiden datakeskusten toimittamasta datasta. Vuodesta 2008 toiminnassa olleeseen menettelyohjeeseen kuuluu 329 datakeskusta ja Pohjoismaista vain muutamia, joten kattavaa kokonaiskuvaa tästä aloitteesta ei saada, vaikka luonteeltaan aloite onkin ainutlaatuinen.

Vuonna 2015 Invest in Finland arvioi Suomen datakeskusten vievän noin 1 % Suomen sähköenergiasta.⁹⁹ Tämä luku vastaa useissa kansainvälisissä arvioissa olevia lukuja datakeskusten osuudesta maailman sähkönkulutuksesta. Mikäli osuus pitäisi edelleen paikkansa, vuoden 2019 sähkönkulutuksella (86 TWh) kulutus olisi ollut 860 GWh. Invest in Finlandin arvion jälkeen Suomessa on otettu käyttöön suuria kv. toimijoiden konesaleja ja olemassa olevien datakeskusten laajennuksia.

Yli 5 MW:n tehoisista datakeskuksista julkaistaan vuosittain verohallinnon dataa, sillä nämä keskuksat kuuluvat vuodesta 2014 alkaen alempaan veroluokkaan II. Vuonna 2019 verohallinnon rekisteröimä yli 5 MW datakeskusten energiankulutus oli 787 GWh. Vaikka Suomessa on ainakin viisi nimellistehoaltaan 5 MW ylittävää datakeskusta (esimerkiksi Ficolo, Google, Telia, Yandex) ja monella toimijalla on useita datakeskuksia, tilastossa näkyvät vain ne, joiden käytössä oleva kapasiteetti yhdessä käyttöpaikassa ylittää 5 MW vuodessa. II veroluokkaan oikeuttava 5 MW yläraja näyttäytyy monelle datakeskustoimijalle korkeana, toisaalta kv. internetyritysten hyperskaalan datakeskusten tehot voivat ylittää tämän tehorajan yli kymmenkertaisesti.

Datakeskusten ympäristövaikutusten seurannan ja arvioinnin sekä mahdollisten toimien tehokkuuden arvioinnin kannalta on ongelmallista, että kokonaiskulutuksesta ei kerätä säännöllisesti tilastotietoa. Datakeskusoperoijien näkökulmasta tiedot yksittäisten datakeskuksen sähkönkulutuksesta voisi paljastaa niiden toiminnasta liikaa esimerkiksi kilpailijoille, eikä vielä toistaiseksi ole löydetty anonymisointia tapaa kerätä säännöllisesti tietoa energiankulutuksista kokonaiskuvan saamiseksi ja seuraamiseksi.

3.2. Datakeskusten suunnittelu, rakentaminen ja operointi

Datakeskuksia on suunniteltu, rakennettu ja operoitu maailmalla sekä Suomessa jo kymmeniä vuosia. Toimiala on tällä hetkellä suuressa muutoksessa ja samalla kun datakeskusten IT- ja sähköteho kasvaa, niistä tullut teollisen mittakaavan digitaalisia prosessilaitoksia. Uudet teollisen mittakaavan datakeskukset kytkeytyvät Suomessa jo pääosin valtakunnalliseen 110 kV -kantaverkkoon.

Kansainvälisessä keskustelussa datakeskuksen suunnittelun, rakentamisen ja operoinnin kokonaisprosessista käytettävä *Design, Build, Operate* -käsite on vakiintumassa myös Suomessa, koska ala on hyvin kansainvälinen. Suunnitteluvaiheessa määrittälään muun muassa tulevan datakeskuksen käytettävyyteen, luotettavuuteen, turvallisuuteen, energiatehokkuuteen, automatisointiin, skaalautuvuuteen, kyberturvallisuuteen.

⁹⁹ Invest in Finland 2015: Data Centers in Finland.

teen ja operointiin liittyviä tavoitteita. Rakentamisvaiheessa on tärkeää huolellisesti toteuttaa, käyttöönottaa ja testata tärkeimmät tekniset järjestelmät ja varmistaa eri järjestelmien välinen systeemi-integraatio.

Datakeskusten suunnittelu, rakentaminen ja operointi on prosessina vielä sangen pilkkoutunut esimerkiksi maksimaalisen energiatehokkuuden ja pienimmän kokonaiskustannuksen saavuttamiseksi. Pilkkoutuminen lisää suunnittelun, rakentamisen ja operoinnin riskejä sekä kustannuksia. Datakeskusten tärkeimmät tekniset infrastruktuuri-järjestelmät ovat sähkönjakelujärjestelmä sekä keskeytymättömän virransyötön takaavat UPS- ja varavoimajärjestelmät (esimerkiksi diesel), jäähdytysjärjestelmät ja automaatiojärjestelmät. Datakeskuksen tuotantoprosessin ytimessä sijaitsevat IT-tilat rakkeineen ja palvelimineen.

3.2.1. Datakeskusautomaatio

Datakeskusten automaatiossa on nykyisin käytössä useita erillisiä järjestelmiä, joita ei pääsääntöisesti ole integroitu päästä-päähän -ratkaisuksi reaaliaikaisen valvonnan, ohjauksen, tuotantotoiminnan sekä energiatehokkuuden mahdollistamiseksi. Tämän mahdollistava teknologia ja ratkaisut ovat jo olemassa.¹⁰⁰ Kuitenkin useilla datakeskuksilla on vain vähän tai ei lainkaan energiankäytön ja ympäristön mittausvalmiuksia, ja monilla ei ole edes erillistä sähkömittaria tai -laskua.¹⁰¹

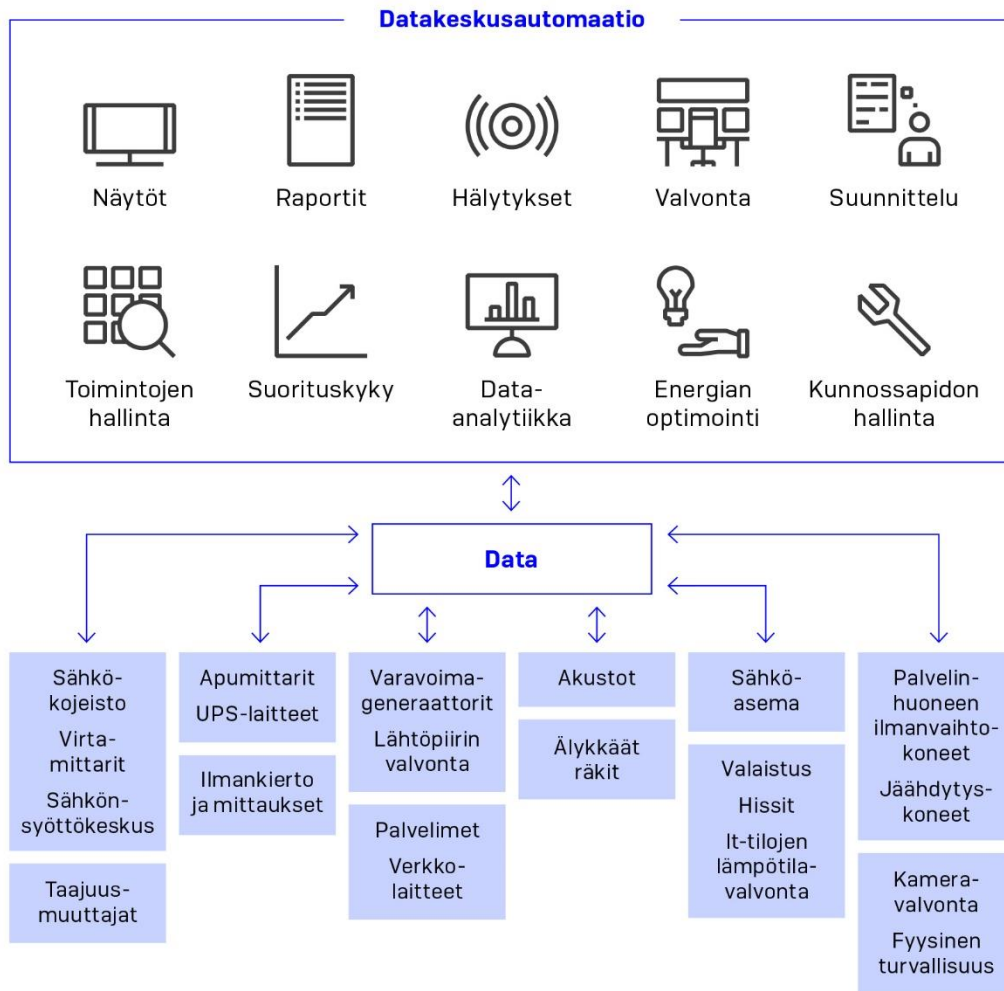
Datakeskusautomaatiosta käytetään yleisesti käsitettä datakeskuksen infrastruktuurin hallintajärjestelmä (DCIM). DCIM:illä voidaan tarkoittaa ylätasoa kokonaisautomaatiojärjestelmää, jolla valvotaan ja operoidaan kaikkia datakeskuksen erillisiä teknisiä infrastruktuureja, järjestelmiä ja laitteita, mukaan lukien IT-tuotantoon liittyviä. DCIM:iin kerätään reaaliaikaista tietoa eri datakeskuksen alajärjestelmistä, kuten energianhallinta-, virranhallinta-, kiinteistönhallinta-, tietotekniikan hallinta-, turvallisuus-, palosammutus- ja valaistusjärjestelmästä sekä muista järjestelmistä. Toisaalta voidaan puhua erityisesti IT-tuotantoa tukevasta infrastruktuurin hallintajärjestelmästä, IT DCIM:stä.

Datakeskuksen automaatiojärjestelmien avulla valvotaan ja ohjataan muun muassa sähkönjakeluverkon tilaa ja asetuksia, varavoimakoneiden koekäyttöä, UPS-laitteiden akustojen kuntoa, jäähdytysjärjestelmän sähkömoottoreiden ja pumppujen kuntoa ja toimintaa, jäähdytyskompressoreiden toimintaa ja IT-tilojen lämpötila- ja kosteusolosuhteita. Datakeskus on prosessikriittinen tuotantolaitos, joka on täynnä älykkäitä digitaalisia laitteita ja järjestelmiä. Kyberturvallisuusuhat ja -valmiudet on otettava huomioon elinkaaren kaikissa vaiheissa.

¹⁰⁰ ABB.

¹⁰¹ Euroopan komissio, 2018: Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency.

Kuva 6. Datakeskus koostuu useista erilaisista järjestelmistä, joita modernissa datakeskuksessa ohjataan kehittyneen automaation avulla. Lähde ja ikonit: ABB.



3.3. Energiatehokas datakeskus

Datakeskus vaatii toimiakseen suuren määrän sähköä palvelinten ja verkkolaitteiden sähkönkulutuksen vuoksi. Palvelinten sähkönkulutus on vahvasti verrannollista niiden tietojenkäsittelykykyyn. Palvelinten komponenteista erityisesti tehokkaat prosessorit kuluttavat merkittävän määrän sähköä.

Datakeskuksessa käytetty sähkö muuntuu palvelimissa ja verkkolaitteissa lämmöksi, joka täytyy pystyä poistamaan tehokkaasti palvelinsaleista. Sähköjärjestelmän häviöistä ja jäähdytysprosessin energiankulutuksesta muodostuva kulutus muodostaa datakeskuksessa energiahukan, joka pyritään energiatehokkaassa datakeskuksessa minimoimaan. Sähkön hinta ja kulutus (MWh/vuosi) muodostaa merkittävän osan suurten

datakeskusten vuosittaisista käyttökustannuksista, eri toimialalähteisiin perustuen 40-70 %. Energiahukan minimointiin on siten taloudelliset perusteet.

PUE-lukua (Power Usage/Utilization Effectiveness) käytetään yleisesti konosalien energiatehokkuuden kuvaamisessa. PUE on konosalin käyttämän kokonaissähköenergian suhde pelkkien IT-laitteiden (palvelimet, verkko- ja tallennuslaitteet) käyttämään sähköenergiaan. Mikäli PUE olisi tasan 1, konesalissa käytettäisiin sähköä vain IT-laitteisiin eikä lainkaan esimerkiksi jäähdytykseen. Arvo 2 tarkoittaisi, että muut toiminnot veisivät yhtä paljon sähköenergiaa kuin varsinaiset IT-järjestelmät itse. Alan toimijoiden järjestö The Green Grid arvioi vuonna 2012, että tuolloisten konosalien PUE-luvut vaihtelevat 1,1:n ja 3,0:n välillä. PUE-luvut ovat laskeneet 2000-luvulla globaalisti, tosin viime vuosina kehitys on näyttää pysähtyneen.¹⁰² Uusien datakeskusten PUE-arvo voi olla niinkin alhainen kuin 1,02–1,20.

Tärkeimmät ratkaisut energiatehokkuuden kannalta tehdään suunnitteluvaiheessa. Datakeskuksessa sijaitsevien laitteiden ominaisuudet ja käyttötarkoitus sekä liiketoimintamalli (sekä primääri- että sekundaarilaitteet) säätelevät datakeskusinfrastruktuurin toteutusta merkittävästi. Toteutukseen ja sitä kautta myös saavutettavissa olevaan energiatehokkuuteen vaikuttavat muun muassa seuraavat seikat:

- Onko laitekanta homogeenista, virtualisoitua palvelinmassaa vai asiakkaan omistamia co-location -tilaa tarvitsevia sekalaisia laitteita
- Tarvitsevatko palvelimet varmennettua ja häiriösuojattua sähköä
- Sisältävätkö palvelimet tietoa, joka edellyttää erityistä fyysistä suojausta
- Millaisissa olosuhteissa laitteisto on suunniteltu toimimaan
- Millaisella primääri- ja sekundaarijäähdytysteknologialla ja -ratkaisulla datakeskus on suunniteltu toimimaan
- Käyttääkö laitteisto vaihtovirtaa vai tasavirtaa
- Millaista sähkönjakelu- ja varavoimateknologiaa (energiatehokkuus/häviöt) käytetään
- Pitääkö datakeskuksen pystyä tukemaan useampaa tekniikkaa, useita varmistusaikavaatimuksia ja useita turvatasoja
- Pystytäänkö hyödyntämään nykyaikaista päästä-päähän (end-to-end) reaaliaikaisesti kaikki infrastruktuurit, laitteet ja toiminnot yhdistävää automaattioratkaisua, joka mahdollistaa energiataseen optimoinnin

Näiden parametrien perusteella voidaan suunnitella hyvin eri tyyppisiä datakeskuksia. Suomessa esimerkiksi Googlen ja Yandexin toteutukset edustavat pilvipalveluntarjoajan omaan spesifiin käyttöön rakentamaa datakeskustoteutusta ja Equinixin, Telian ja Ficolon toteutukset puolestaan yleiskäyttöistä co-location -tilaa. Co-location asettaa haasteita kaikkein alhaisimpien PUE-arvojen saavuttamiselle, samoin hukkalämmön mahdollinen hyödyntäminen (ks. alla).

PUE-arvojen sijaan energiatehokkuuden mittaamisessa voidaan käyttää myös muita tunnuslukuja, kuten *Data Center Workload Power Effectiveness* DCWPE:tä.

¹⁰² <https://journal.uptimeinstitute.com/is-pue-actually-going-up/>

3.3.1. Datakeskuksen sähköjärjestelmä

Datakeskuksen sähköjärjestelmä koostuu liitynnästä sähköverkkoon, laitoksen sisäisestä jakeluverkosta, jännitteen muuntamisesta käyttöjännitteeseen, luotettavan sähkönsaannin varmistavista generaattoreista, sähkönjakelun häiriöttömyyden varmistavista UPS-laitteista ja akustoista sekä käyttöjännitteen jakelusta laitesaleihin tietoteknisille laitteille. Tyypillisesti datakeskuksessa pyritään keskeytyksettöömään sähkönjakeluun laitteille, jolloin edellä mainitut rakenneosat on usein kahdennettu käyttövarmuuden takaamiseksi ja käytönaikaisen huollon mahdollistamiseksi.

Sähköjärjestelmän rakenneosissa esiintyy aina energiahäviötä esimerkiksi johtimien resistanssin vuoksi. Datakeskuksen monikerroksisessa sähkönjakeluketjussa tämä näkyy useina peräkkäisinä energiahäviöinä, joista yhdessä muodostuu jo 10 %:n suuruusluokkaa oleva energiahäviö sähköliittymän ja laitesalin sähköä käyttävien laitteiden välillä (kuva 7). Kahdennetussa järjestelmässä laitteiden kaikki kapasiteetti ei ole koskaan käytössä, ja UPS-laitteet ja muuntajat voivat toimia epäoptimaalisella tehoalueella kasvattaen energiahukkaa suhteessa optimiolosuhteiden tavoitearvoihin. UPS-laitteissa ja akustoissa tehtävät vaihtovirta-tasavirta -muunnokset eivät ole hyötysuhteeltaan ideaalisia, jolloin sähkön häiriöttömyyden takaaminen heikentää kokonaisuu- den hyötysuhdetta entisestään verrattuna varmentamattomaan sähköjärjestelmään.

Energiatehokkaassa toteutuksessa sähköverkon rakenneosat täytyy valita huolella ja mitoittaa täsmällisesti suhteutettuna datakeskuksen toteutuneeseen sähkökuormaan.

Rakenneosien hyötysuhde on hyvin riippuvainen toteutuneesta käyttötehosta ja hyötysuhde on usein erityisen heikko esimerkiksi muuntajan tai UPS-laitteen toimiessa va- jaateholla pienen toteutuneen sähkökuorman vuoksi. Esimerkiksi muuntajan tai UPS-laitteen energiatehokas toteutus on kuitenkin kallista ja komponenttien valinnassa on verrattava elinkaaren aikaista energiansäästöä ja toisaalta korkeampaa hankintahin- taa. Samoin sähköjärjestelmän varmennus- ja kahdennus täytyy optimoida tarpeetto- man energiahukan minimoimiseksi. Ylimääräiset, aktiivisena olevat komponentit kulut- tavat aina energiaa ja esimerkiksi akustojen lataaminen synnyttää energiahuk- kaa.^{103,104,105}

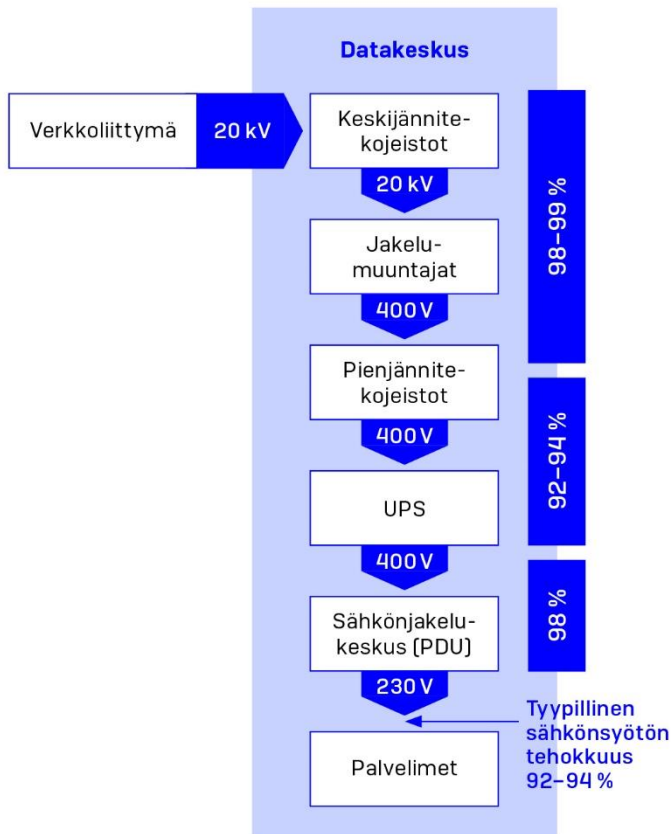
Datakeskuksen sähköjärjestelmässä luotettavana varavoiman lähteenä pidetään yleis- sesti dieselkäyttöistä generaattoria. Suomalainen sähköverkko on tyypillisesti niin luo- tettava, ettei generaattoreita käytännössä useinkaan käytetä datakeskuksen sähkön tuotantoon, vaan niiden käyttö rajautuu harvinaisiin sähköverkon häiriötilanteisiin. Näin ollen dieselkäyttöisen varavoiman rooli datakeskuksen energiankulutuksesta on useim- miten pieni rajautuen säännöllisiin koekäyttöihin ja harvinaisten vikatilanteiden hallin- taan. Hiilidioksidipäästöistä merkittäväkin osuus voi kuitenkin syntyä varavoiman käy- töstä.

¹⁰³ https://tc0909.ashraetcs.org/documents/ASHRAE_TC0909_Power_White_Pa- per_22_June_2016_REVISED.pdf

¹⁰⁴ <https://www.google.com/about/datacenters/efficiency/>

¹⁰⁵ <http://green-data.blogspot.com/2017/12/multimode-UPS-boost-data-center-effi- ciency.html>

Kuva 7. Datakeskuksen sähkönjakeluketjussa häviää energiaa.



3.3.2. Jäähdytys

Tyypillisesti tietojenkäsittelylaitteet vaativat vakioituja lämpötila- ja kosteusolosuhteita. Ashrae-viitekehyksessä laitesalin jäähdytysilman lämpötilasuositus on 18–27 °C ja suhteellinen kosteus tasolla 60 % RH. Jos olosuhteet poikkeavat merkittävästi suositelluista, laitteiden tekninen käyttöikä lyhenee ja laitevaurioiden riski kasvaa heikentäen toiminnan luotettavuutta ja kustannustehokkuutta.

Ashrae-viitekehys määrittelee useita ei-olosuhdeluokkia, joista tiukin A1 on tavallisimmin tietoteknisissä ympäristöissä käytetty luokka. Väljemmät olosuhterajat (A2-C) mahdollistavat esimerkiksi laajemman olosuhdehaarukan, jolloin vaatimukset jäähdytysratkaisulle voivat olla kevyemmät mahdollistaen paremman energiatehokkuuden. Esimerkiksi teleoperaattorien käyttämät verkkolaitteet, tukiasemalaitteet ja mobiiliverkon komponentit toimivat tyypillisesti väljempien olosuhterajojen puitteissa mahdollistaen operaattorin verkkoihin liittyvissä laitetoissa energiatehokkaamman jäähdytysratkaisun kuin datakeskuksissa.

Laitesalien jäähdytys on tyypillisesti suurin yksittäinen energiahävikkiä synnyttävä datakeskuksen osa ja siksi sitä pyritään optimoimaan. Laitteiden synnyttämän lämpökuorman poistaminen laitesaleista voi kuluttaa energiaa 10–100 % datakeskuksen laitteiden käyttämästä energiasta. Jäähdytysprosessin energiatehokkuuteen vaikuttavat merkittävästi seuraavat tekijät:

- Datakeskuksen ympäristössä vallitsevat sääolosuhteet
- Laitesalien tavoitelämpötilat ja mahdolliset poikkeamat
- Datakeskusrakennuksen ominaisuudet
- Järjestelmällinen asennustapa laitesaleissa
- Turvallisuusvaatimukset
- Valittu jäähdytysratkaisu

Suomessa ilmasto mahdollistaa datakeskuksen vapaajäähdytyksen, ja se onkin meillä yleisimmin käytetty jäähdytystapa. Vapaa jäähdytyksessä jäähdytysilma tai -nesteytetään vallitsevia ympäristöolosuhteita hyödyntäen tavoitelämpötilaan tyypillisesti ulkoilmassa sijaitsevien lauhduttimien tai käytettävissä olevan pintaveden avulla. Viileässä ilmastonalassa datakeskuksen laitesalit voidaan jäähdyttää tavoitelämpötilaan vapaa jäähdytyksen avulla jopa yli 90 % vuodesta.¹⁰⁶ Tällöin jäähdytysprosessin energiankulutus rajautuu ilman tai nesteen kierrättämiseen, lämmönsiirtoon jäähdytysnesteen ja ilman välillä sekä lauhduttimien toimintaan tarvittavaan energiankulutukseen. Optimaalisesti toimiva vapaa jäähdytysprosessi kuluttaa energiaa vain joitain prosentteja suhteessa laitesalien hyötykuormaan. Hukkalämmön hyödyntämistä sen ulkoilmaan/veteen johtamisen sijaan on käsitelty luvussa 3.6.3.

Vapaa jäähdytyksen tehokkaan toiminnan edellytyksenä on korkeahko laitesalin tavoitelämpötila. Aiemmin mainittujen Ashrae-suositusolosuhteiden yläpään saavuttaminen vapaa jäähdytyksen avulla on esimerkiksi vapaassa ulkoilmassa sijaitseviin lauhduttimiin perustuvan jäähdytyksen avulla olennaisesti helpompaa suuremman osan vuodesta kuin lämpötilahaarukan alapään saavuttaminen. Helsingin Kaisaniemen mittausasemalla on esimerkiksi vuoden 2019 aikana yli 20 °C:n lämpötiloja mitattu 5,4 %:n osuudella kaikista vuoden havaintotunneista ja Ashrae-ylärajan 27 °C ylittäviä lämpötiloja vain 28 tunnin aikana.

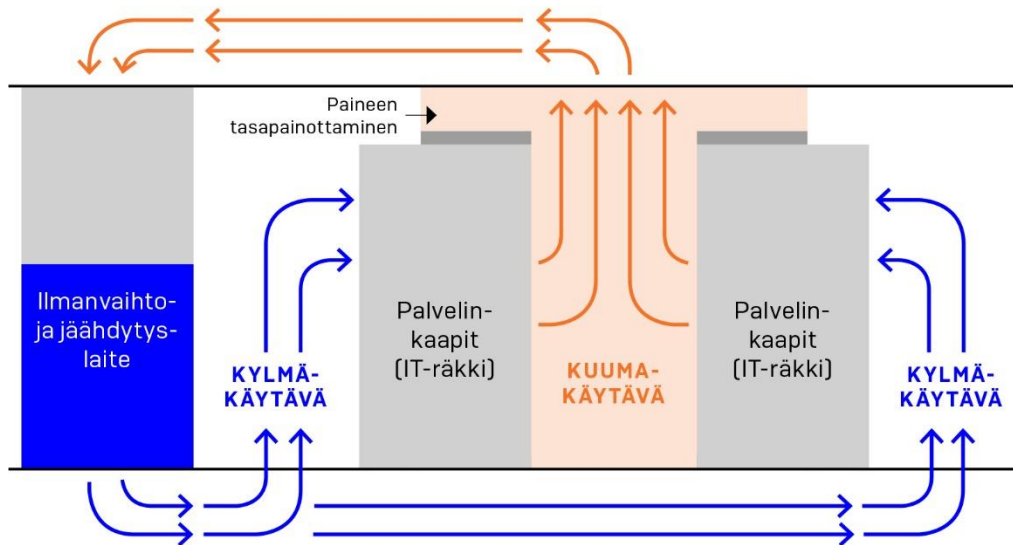
Jäähdytyksen hyötysuhdetta parantaa myös mahdollisimman esteetön nesteen tai ilman kierto prosessissa. Tähän vaikuttavat jäähdytysputkiston pituus, jäähdytysputkiston virtausnopeus, käytettyjen pumppujen tyyppi, ilmanvaihtokanavien suuruus, laitesalien jäähdytysilmareittien esteettömyys, laitesalin ilmatilan korkeus sekä kylmän ja kuumen ilman selkeä erottelu laitesalissa. Jäähdytyksen optimointi on tehokkainta, jos edellä mainitut tekijät huomioidaan jo datakeskusrakennusta suunniteltaessa. Hyvä suunnittelu ja lopullisen jäähdytystarpeen tunnistaminen verkoston suunnitteluvaiheessa on erittäin tärkeää oikean mitoituksen mahdollistamiseksi.

Laitesalin sisällä jäähdytysilman virtauksen hallinta on keskeinen osa energiatehokasta datakeskustoteutusta. Tämä edellyttää toimivaa perusratkaisua kuuma- tai kylmäkäytävän muodossa kylmän ja kuumen ilman hallitsemattoman sekoittumisen estämiseksi ja

¹⁰⁶ <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>

jäähdytysilman kohdentamiseksi oikeaan paikkaan (kuva 8).¹⁰⁷ Laitteiden hallittu jäähdytysilman otto käytävän kylmältä puolelta ja laitekaappien tiiveys vuotovirtauksien estämiseksi täytyy hallita järjestelmällisellä asennustavalla ja laitevalinnalla datasalissa.

Kuva 8. Kuuma-kylmäkäytäväjärjestely parantaa datakeskuksen jäähdytyksen energiatehokkuutta.



Vapaa jäähdytyksen rinnalla datakeskuksissa on lähes poikkeuksetta muu jäähdytysjärjestelmä, jolla katetaan aika, jolloin vapaa jäähdytysratkaisu ei ole täysin tai ollenkaan käytettävissä esimerkiksi vallitsevan sääolosuhteen vuoksi. Tällöin käytetään tyypillisesti kompressoritoimisia vedenjäähdytyskojeita tai vakioilmastointikojeita ensisijaisen järjestelmän tukena. Näiden järjestelmien energiatehokkuus on heikko, mutta merkitys vuotuisen energiankulutuksen näkökulmasta varsin rajallinen, jos vapaa jäähdytys on ideaalisti toteutettu. Datakeskuksen automaatio tukee jäähdytysjärjestelmän optimointia.

Datakeskuksen turvallisuusvaatimukset rajaavat jossain määrin käytettävissä olevia jäähdytysratkaisuja. Laajojen ilmanvaihtokanavien vieminen painesuojaan tai kaasutii- viiseen luolatilaan ei esimerkiksi ole mahdollista, jolloin käytettävissä oleva jäähdytyskeinovalikoima rajautuu nestekiertoisiin tai sähkötoimisiin ratkaisuihin.

¹⁰⁷ <https://cool-shield.com/aisle-containment>

3.3.3. Muu energian kulutus

Datakeskuksen sähkönkulutukseen vaikuttavat laitoksen valaistus, lämmitys, ilmanvaihto, ylläpito sekä valvomo- ja toimistotyö. Palvelininfrastruktuurin energiantensiivisyyden vuoksi näiden osuuksien merkitys kokonaisuuden kannalta on melko vähäinen ja osaltaan minimoitavissa saatavilla olevilla teknisillä ratkaisuilla.

3.4. Datakeskusten muut ympäristövaikutukset

Ne datakeskukset, jotka kuuluvat ympäristönsuojelunlain soveltamisalan (toiminta aiheuttaa ympäristön pilaantumisen vaaraa) piiriin, vaativat rakennusluvan lisäksi ympäristöluvan. Ympäristöluvituksessa tarkastellaan muun muassa seuraavia asioita, toki tarkastelun fokus riippuu viime kädessä datakeskuksen toiminnan volyymistä, sijoittelusta, jäähdytys- ja varavoimaratkaisusta ja muista kysymyksistä:

- dieselgeneraattorien päästöt ilmaan
- generaattorien polttoaineen ja muiden mahdollisten kemikaalien varastointi ja lastaus
- vedenkäyttö ja viemärointi
- melu
- liikenne
- jätteet ml. vaaralliset jätteet, kuten raskasmetallit ja öljyt
- vaikutukset maaperään ja pohjaveteen
- vesijäähdytteisen datakeskuksen vaikutukset vastaanottavassa vesistössä

Käytännössä lupamääräyksiä annetaan erityisesti jätteiden ja vaarallisten aineiden varastoinnista ja käsittelystä sekä generaattoreiden päästörajoista ja vesijäähdytteisten datakeskusten tapauksessa veden johtamisesta vesistöön. Varavoimageneraattorien polttoainetehot ja polttoaineen varastointi sekä veden johtamiseen liittyvät vaikutukset ovat myös niitä perusteita, joihin ympäristöluvan tarpeet perustuvat.¹⁰⁸ Ympäristönsuojelulain mukaan luvanvaraisen toiminnan harjoittajan on myös huolehdittava ja varmistuttava toiminnan energiankäytön tehokkuudesta.

Ajantasaiset ja energiatehokkaat palvelimet ovat tärkeässä asemassa palvelinkeskusten energiatehokkuuden ylläpitämisessä. Palvelimien ja muiden laitteiden uusimiseen ja ylipäättään datakeskuksiin liittyvien materiaalivirtojen ymmärrys ja aiheesta tehty selvitykset ovat kuitenkin vähissä¹⁰⁹ ja kokonaiskuvan muodostaminen vaatisi lisätutkimusta.

¹⁰⁸ Päätös 258/2017/1 Dnro ESAVI/9910/2016; Päätös Nro 159/2013/1 Dnro ESAVI/230/04.08/2012; Ympäristönsuojelulaki 27.6.2014/527.

¹⁰⁹ Köhler ym. 2018: Energie- und Ressourcenverbräuche der Digitalisierung. Öko-Institut.

Suomessakin on joitakin esimerkkejä datakeskusten rakentamisesta käytöstä poistuneisiin tehdaskiinteistöihin. Jo teollisuuskäyttöön otettujen alueiden käyttäminen lähempänä luonnontilaista aluetta olevan alueen sijaan voidaan pitää ympäristön kannalta positiivisena, erityisesti jos rakentamisessa hyödynnetään alueella jo olevia materiaaleja. Toisaalta tällaiset kiinteistöt saattavat sijaita hukkalämmön hyödyntämisen kannalta epäedullisessa paikassa, etäällä lämmön potentiaalisista hyödyntäjistä.

3.5. Tulevaisuuden kehityskulkuja

3.5.1. Datakeskuksista reunalaskentaan?

Datan varastoinnin ja prosessoinnin ennustetaan muuttuvan tulevaisuudessa. EU:n datastrategian¹¹⁰ mukaan maailmassa 80 % datasta prosessoidaan nykyisin keskitetyissä datakeskuksissa ja 20 % älykkäissä laitteissa ja käyttäjää lähempänä olevissa laskentapaikoissa (nk. reunalaskenta, edge computing). Jo vuonna 2025 nämä luvut voisivat EU:n arvion mukaan olla kääntyneet toisin päin ja tuoda mukaan taloudellista etua, kestävyttä ja mahdollisuuksia oman datan kontrollointiin.

Erityisesti langaton tiedonsiirto - varsinkin 4G/5G, LoRa, LiFi - on tuonut pilvilaskennan ohkeen reunalaskennan, jonka alun perin nähtiin tukevan erityisesti esineiden internetiin (IoT) liittyviä laskentatarpeita, mutta sitä on sovellettu paljon myös tavanomaisemmissa hajautetun laskennan tarpeissa.

Reunalaskennan hyödyntämistä koskevan tutkimuksen pääpaino on ollut laskentajärjestelmän suorituskyvyn parantamisessa ja tyypillisesti on optimoitu laskennan viivettä (latenssia), suoritusaikaa, luotettavuutta ja tietoturvaa. Luultavasti nimenomaan muun teknologisen kehityksen nopeuden vuoksi energiatehokkuus on ollut pitkään sivuroolissa ja siihen on alettu kiinnittää huomiota vasta kun (pilvi)palvelujärjestelmien energiankulutus on kasvanut merkittäväksi.

Joillakin palvelukokonaisuuksilla reunalaskennalla voidaan saavuttaa merkittäviä - jopa 80 %¹¹¹ - energiansäästöjä verrattuna keskitettyyn pilvijärjestelmään, mutta säästöjä tuottavat verkkorakenteet (yleisemmin topologiat) ovat palveluspesifejä. Hyötyjä on saatu silloin kun energiatehokkuus on ollut suunnittelun lähtökohtana, laskennan ja tietoliikenteen suhdetta on optimoitu kyseisessä toteuttavassa hajautetussa laskentajärjestelmässä, ja lisäksi on osattu ottaa huomioon toteutettavan palvelun ominaispiirteet. Yleistä energiaa säästävää ratkaisua ei näytä olevan näköpiirissä. Energiaa säästävä laskentaratkaisun toteuttaminen vaatii usein erityisosaamista ja aikaa vaativaa kehittämistä.

IoT-tyyppisten reunalaskennan sovellusten kohdalla korostuu langattoman tiedonsiirron energiankulutuksen lisäksi myös sensoreiden ja erilaisten kenttä/gateway -laitteiden

¹¹⁰ COM(2020) 66 final: A European strategy for data.

¹¹¹ Esimerkiksi Ming Yan et. al. 2019: Modeling of Total Energy Consumption of Mobile Network Services and Applications. MDPI Journal of Energies.

den energiatehokkuus suhteessa datakeskuksissa tehtävän laskennan energiatehokkuuteen. Merkittävää on myös se, operoidaanko reunalaskentaa akuilla vai virtasyötöllä, ja voidaanko tarvittava energia tuottaa uusiutuvilla lähteillä.

Koska energiatehokkuuden parantamiseen tarvitaan palveluspesifejä toteutuksia, kohdistuvat odotukset palveluiden ja resurssien dynaamisen hallinnan keskittyviin järjestelmiin. Virtuaalikoneympäristö tarjoaa mekanismit palveluiden hajauttamiseen ja siten mahdollisuuksia energiatehokkaaseen palveluiden hajauttamiseen reunalaskennan piiriin. The Green Grid -organisaatio on tuonut esiin tarpeen hyödyntää datakeskusten energiatehokkuuteen liittyvää PUE-ajattelua myös reunalaskennan pienissä laskentakeskuksissa/-elementeissä. Luonnollisena kehityksenä voisi pitää sitä, että järjestelmävalmistajat lisäisivät energiatehokkuutta edistäviä ominaisuuksia esimerkiksi kokonaisuuksia hallinnoiviin DCIM-järjestelmiin.

3.5.2. Kvanttilaskenta

Laskentakapasiteetin tarpeen edelleen kasvaessa nykyisten teknologioiden rajat tulevat jossain vaiheessa vastaan energiatehokkuuteen pyrkimisessä. Kvanttitietokoneet ovat jo tällä hetkellä rajoitetussa käytössä, mutta tavanomaiset supertietokoneet pysyvät perustyojuhtina kuitenkin vielä koko tämän vuosikymmenen. Pitkällä tähtäimellä kvanttitekniologiat ovat kuitenkin potentiaalisen energiatehokkuutensa vuoksi tähdellisiä ilmastonmuutoksen torjumisen kannalta. Tämä vaatii pitkän tähtäimen kehitystyötä sekä kvanttitietokoneiden rakentamisen että kvanttialgoritmien kehityksen osalta (ks. lisää luku 8).

Kvanttitietokoneissa käytetään usein suprajohdavia piirejä, jolloin itse laskun suorittaminen vie hyvin vähän virtaa. Ylivoimaisesti suurin energiankulutus syntyy kvanttitietokoneen jäähdyttämisestä. Tällä hetkellä kvanttitietokoneiden suorittimet on jäähdytettävä lähelle absoluuttista nollapistettä (-273 °C). Jäähdytettävä tila on kuitenkin hyvin pieni. Verrattuna tavanomaiseen konesaliin koko salia ei tarvitse jäähdyttää, ainoastaan itse suoritin. Kvanttitietokone itsessään tuottaa hyvin vähän lämpöä, mikä edelleen vähentää jäähdytystarvetta. Esimerkiksi D-Wave Systemsin suurin kvanttitietokone, D-Wave 2000Q, tarvitsee 25 kW.¹¹²

Sellaisiin kysymysten ratkaisuun, joihin esimerkiksi nykyinen D-Wave 2000Q soveltuu, kvanttitietokoneen energiatarve on arvioitu olevan noin sadasosa digitaaliseen supertietokoneeseen verrattuna.¹¹³ Koska jäähdytystarve on hyvin lokaali, on odotettavissa, että energiankulutus kasvaa maltillisesti kvanttitietokoneiden tehon kasvaessa. Täten, tulevaisuudessa, kvanttitietokoneiden laskentateho energiayksikköä kohden parantuu entisestään. Tätä voidaan pitää erityisesti vaativaa laskentaa edellyttävien tehtävien kannalta lupaava kehityskulku.

¹¹² D-Wave Systems 2020: Practical Quantum Computing - D-Wave Technology Overview.

¹¹³ <https://www.top500.org/news/d-wave-intros-2000-qubit-quantum-computer-reveals-first-buyer/>

3.6. Keinoja datakeskusten ilmasto- ja ympäristövaikutusten hallintaan

Alla kuvataan datakeskusten ympäristö- ja ilmastovaikutusten hallinnan keinovalikkoa, joka kytkeytyy datakeskuksiin sähköenergian käyttäjinä: 1) sähköntarpeen kasvun hillitseminen energiatehokkuutta lisäämällä, 2) käytetyn sähköenergian lähteiden vaikutus päästöihin, 3) sähkökäyttöisten laitteiden toiminnasta syntyvän lämpöenergian hyödyntäminen sekä 4) muut keinot.

3.6.1. Energiatehokkuuden lisäämisen kannusteet ja esteet

Energiatehokkaan datakeskuksen toteuttamisessa tarvittava teknologia ja osaaminen on saatavilla markkinoilta useilta toimittajilta ja energiatehokkaista kohteista on viime vuosilta olemassa useita referenssitoteutuksia. Markkinoilla olevilla suunnittelijoilla, rakentajilla, teknologiatoimittajilla ja projektinvetäjillä on riittävä osaaminen ja kokemus uusien laitosten toteuttamiseksi ja olemassa olevien kohteiden energiatehokkuuden parantamiseksi. Datakeskusinvestoinnit ovat kuitenkin mittavia ja taloudellisesti kannattava toteuttaminen edellyttää laajaa yrityksen sisäsyntyistä kapasiteettitarvetta tai kaupallista kysyntää kapasiteetille.

Datakeskustoiminnassa tuotannon mittakaavaetu on ilmeinen ja suuren kapasiteettikeskittymän energiatehokas toteutus on helpompaa kuin useiden pienten tilojen saneeraus. Kaupallisesti toimivat teollisen mittakaavan datakeskukset tai pilvipalveluntarjoajat pyrkivät lähes poikkeuksetta parhaaseen mahdolliseen energiatehokkuuteen käyttökustannusten ja kannattavuuden optimoimiseksi. Vastaavasti pienessä datakeskuksessa energiakustannuksen osuus tai absoluuttinen suuruus voi olla pieni suhteessa kokonaiskustannukseen tai energiatehokkuuden parantamiseksi vaadittaviin investointeihin.

Suuren mittakaavan tarkoituksenmukaisesti toteutettu datakeskus on myös lähtökohteisesti muuhun tarkoitukseen rakennettua tilaa tehokkaampaa. Pienessäkin datakeskuksessa joudutaan tyypillisesti varautumaan kuormapiikkeihin ja rakentamaan tehokkuutta heikentävää ylikapasiteettia. Suuressa yksikössä kuorman muutokset käyttäytyvät tilastollisesti ennustettavammin ja ylikapasiteetin mitoittaminen ja pitäminen kohtuullisena toimii pieniä yksiköitä tehokkaammin.

Siirtyminen olemassa olevista tiloista energiatehokkaaseen datakeskukseen on tyypillisesti kallista, mikä hidastaa energiatehokkuuden toteutumista. Vaikka kehitys on kulke-massa hajautetuista pienistä datakeskuksista keskitetympiin palveluihin (ks. 3.1), Suomessa on edelleen käytössä myös 1990-luvun lopulla ja 2000-luvun alussa rakennettua konesalikantaa, joiden siirtymä energiatehokkaisiin laitoksiin lisäisi edelleen energiatehokkuutta. Tämän strategiatyön yhteydessä tarkempaa arvioita tällaisten konesalien/laitetilojen määrästä tai energiankulutuksesta ei ole kuitenkaan laadittu.

Useissa teollistuneissa maissa datakeskusliiketoiminta tulkitaan energiantensiiviseksi liiketoiminnaksi ja sille myönnetään verotukia. Suomessa yli 5 MW:n tehoiset laitokset ovat oikeutettuja hyödyntämään II-veroluokkaa ja saavat merkittävän sähköveron ja

kustannusten aleneman hyödykseen, mikä kannustaa suuren mittakaavan keskittämiseen. Käytännössä kuitenkin 5 MW raja on monelle datakeskukselle korkea (ks. myös 3.1).

3.6.2. Sähkön lähteet

Datakeskusten ilmastopäästöt syntyvät pääosin sähköenergian tuotannon aiheuttamista päästöistä. Suuri osa toimijoista ja konesalipalvelujen asiakaskysynnästä on valitsevassa tilanteessa suuntautunut uusiutuvien energialähteiden käyttöön ilmastoa lämmittävien päästöjen vähentämiseksi. Suomen datakeskustoimijoista esimerkiksi Elisa, Ficolo, Google, Hetzner, Telia ja TietoEVERY ovat ilmoittaneet hankkivansa datakeskuksiinsa ainoastaan uusiutuvilla energialähteillä tuotettua sähköä.

Käytännössä uusiutuvien energialähteiden käyttö toteutetaan hankkimalla uusiutuvilla luonnonvaroilla tuotetun sähkön alkuperätodistuksia vastaaman vuotuista sähkön käytömäärää. Suuret toimijat voivat myös solmia PPA-sopimuksia uusiutuvaa energiaa tuottavien yhtiöiden kanssa eli sitoutua pitkälle aikavälille ostamaan valittujen voimaloiden kapasiteetin (ks. luku 2.2.3).

Datakeskusten uusiutuvan energian suoran fyysisen energiankäytön yksi käytännön haaste on se, että datakeskusten energiankulutus on melko tasaista vuorokauden ympäri uusiutuvan energian tuotannossa ollessa suuria vaihteluita. Google on selvittänyt hiilivapaan vuorokaudenaikaista saatavuutta vuoden mittaan verrattuna Suomen datakeskuksensa kulutukseen. Tämän selvityksen mukaan hiilivapaan sähkön saatavuus ja datakeskusten käyttö vastaavat toisiaan vuoden kuluessa jopa 97 % ajasta (vuonna 2017).¹¹⁴ Hiilivapaa sähkö käsittää tässä tapauksessa Googlen PPA-sopimusten piirissä Suomessa olevan tuulivoiman tuotannon ja silloin, kun se ei ole riittävä, Suomen verkkoon uusiutuvalla energialla sekä ydinvoimalla tuotetun sähkön.

Uusiutuvan sähköntuotannon ja kulutuksen eriaikaisuuteen voidaan pyrkiä vastaavaan esimerkiksi varastoimalla sähköä akustoihin¹¹⁵. Google kehittänyt hyperskaalan datakeskuksissaan kysyntäjoustomekanismia, jossa laskentaa keskitetään niihin tunteihin, kun hiiletöntä ja uusiutuvaa energiaa on eniten saatavilla. Järjestelmä hyödyntää päivittäisiä ennusteita sähköntuotannon vaihteluista yhdistäen ne yhtiön sisäiseen arvioon eri tunteina tarvittavasta laskentakapasiteetista.¹¹⁶

3.6.3. Hukkalämmön hyödyntäminen

Toimiva datakeskus tuottaa merkittävän määrän hukkalämpöä lämmenneeseen jäädysnesteeseen tai poistoilmaan. Syntynyt hukkalämpö pyritään tyypillisesti vapauttamaan

¹¹⁴ Sähköposti Devon Swezey/Google 24.4.2020.

¹¹⁵ Pärssinen 2019: Towards Sustainable Data Centers and Data Services. Aalto University Publication Series.

¹¹⁶ <https://www.blog.google/inside-google/infrastructure/data-centers-work-harder-sun-shines-wind-blows/>

dytyksen avulla haihduttamaan ympäröivään ilmaan tai vesistöön. Hukkalämmön hyödyntäminen mahdollistaa kertaalleen käytetyn energian hyödyntämisen uudelleen ja voi vähentää lämmöntuotantotarvetta muilla resursseilla. Esimerkiksi Elisa on laskenut, että yhden datakeskuksen hukkalämpöä hyödyntämällä voidaan vähentää kaukolämmön tuotannon hiilidioksidipäästöjä 1300–1500 tonnia vuodessa, mikä vastaisi 130–150 suomalaisen hiilijalanjälkeä.

Datakeskuksen hukkalämpö voidaan hyödyntää kaukolämpöverkoissa ja korvata siten osittain muiden energianlähteiden käyttäminen. Hyödyntämisen edellytyksenä on 1) datakeskuksen sijoittuminen alueelle, jossa kaukolämpöverkko on riittävän lähellä, 2) menetelmä hukkalämmön keräämiseksi tehokkaasti talteen ja lämmön saattaminen kaukolämpöverkon vaatimaan muotoon ja 3) kaupallisesti järkevät perusteet lämmön keräämiseksi ja hyödyntämiseksi vaadittavien investointien kattamiseksi. Yksi haaste on myös lämmön hyödyntäminen lämpiminä vuodenaikoina.

Tyypillisesti datakeskuksen hukkalämpö on olemukseltaan noin 30-asteista ilmaa tai jäähdytysnestettä. Kaukolämpöverkko edellyttää vuoden ajasta riippuen noin 70–90 -asteista vettä. Hukkalämmön hyödyntämiseksi syötettävän veden lämpötila täytyy nostaa lämpöpumpulla kaukolämpöverkkoon sopivaksi. Hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkossa edellyttää siis investointia lämpöpumppuun, joka myös kuluttaa jonkin verran lisäsähköä. Toisaalta datakeskuksen normaalin jäähdytysjärjestelmän sähkön käyttö vähenee, kun jäähdytystä tuotetaan myös lämpöpumpulla.

Datakeskus tarvitsee aina myös varajärjestelmänä toimivan vaihtoehtoisen jäähdytysjärjestelmän niitä tilanteita varten, kun lämpöpumppu ei pysty siirtämään lämpöä kaukolämpöverkkoon, esimerkiksi lämpöpumppujen huoltokatkojen tai muiden mahdollisten pysähdysten aikana. Näin ollen kuvattu lämmönsiirtoratkaisu ei yleensä yksin korvaa investointitarvetta vapaajäähdytykseen tai vedenjäähdytyskoneisiin verrattuna, vaan edellyttää lisäinvestointeja.

Datakeskuksen lämmöntuotannon pysyvyys on tasaista ja varmaa, mikä lisää kaukolämpöyhtiön kiinnostusta sen hyödyntämiseen. Datakeskuksissa syntyvä lämpöenergia on itsessään ilmaista, mutta sen talteenotto ja hyödyntäminen vaatii investointeja. Edellytys hukkalämmön taloudelliselle hyödyntämiselle kaukolämpöverkossa on, että se on edullisempaa kuin sillä korvattu lämpöenergia.

Datakeskuksen hukkalämpöä on mahdollista hyödyntää myös siten, että lämpö syötetään kaukojäähdytysverkon tuotantolaitokselle palaavaan putkeen. Tuotantolaitoksella olevalla lämpöpumpulla hukkalämpöä voidaan käyttää kaukolämmön energialähteenä. Kaukojäähdytysverkkojen hyödyntämistä rajoittaa niiden rajoittuminen vain melko harvoin kaupunkeihin ja rajatuille alueille.

Datakeskusten hukkalämmön hyödyntämisestä on Suomessa positiivisia esimerkkejä, mutta sen välillä julkisessakin keskustelussa näkyvän suuren potentiaalin voidaan katsoa olevan vajaasti hyödynnetty. Kiinnostusta ja taloudellista kannattavuutta datakeskuksissa syntyvän hukkalämmön hyödyntämiseen lisännee Suomessa tällä hetkellä

keskustelussa oleva energiaveron uudistaminen siten, että kaukolämpöverkkoon lämpöä tuottavien lämpöpumppujen ja konesalien sähkö siirrettäisiin alempaan veroluokkaan II.¹¹⁷

3.6.4. Muita keinoja

Operointilämpötilan nostaminen

Datakeskuksen operointilämpötilaa nostettaessa vuotuinen vapaajäähdytyskausi pitelee, koneellisen kylmän tuottamisen ajanjakso lyhenee ja siten energian kulutus vähenee. Jäähdytyslämpötilan nostaminen tosin johtaa joko tuulettimien tai vesipumppujen kierrosten nostamiseen, mutta siihen kuluva energia on huomattavasti pienempi kuin koneellisen kylmän tuottamiseen tarvittava energia. Korkeampi lämpötila myös lyhentää komponenttien elinikää, mutta tämän vaikutusta saatavissa oleviin hyötyihin on vaikea yksiselitteisesti määrittää, koska erityisesti suurissa datakeskuksissa palvelimien vaihtonopeus on muuten verrattain nopeaa.

Operointilämpötilan nostaminen on yleistynyt ja monet alan isot toimijat käyttävät nykyisin datakeskuksiaan aiempaa korkeammissa lämpötiloissa. Keinosta on enemmän hyötyä lämpimämmässä ilmanalassa kuin Suomessa.

Kun lämminvesijäähdytteisten järjestelmien operointilämpötilaa pidetään mahdollisimman korkealla, säästetään jäähdytyspiirin energiaa, ja lauhduttimien ja pumppujen energiankulutuksen pienentyvät. Tällöin myös hukkalämmön hyödyntäminen voidaan toteuttaa kustannustehokkaammin, koska kaukolämpöön menevän veden lämpötilaa on valmiiksi korkeammalla.

Prossessorien ja elektroniikan suora nestejäähdytys

Viime aikoina käyttöön on otettu rajallisessa määrin suoraa nestejäähdytystä käyttäviä palvelinratkaisuja erityisesti suurteholaskentaan liittyvissä sovelluksissa. Prossessoritehojen kasvaessa datakeskusten paikalliset tehotiheydet ja lämpökuormat kasvavat.¹¹⁸ Nestejäähdytys mahdollistaa tehokkaamman lämmön siirron suuremmalla jäähdytysnesteellä lämpötilalla, jolloin korkeakaan ulkoilman lämpötila ei estä nestekiertoisen vapaajäähdytyksen toimintaa. Tällöin vapaajäähdytys voisi periaatteessa toimia koko vuoden ympäri esimerkiksi ilman kompressoritoimista varajärjestelmää.

Sähköverkon tukeminen

Datakeskuksen luotettavaan sähköjärjestelmään kuuluu tyypillisesti merkittävä määrä akustoja ja generaattoritoimista varavoimaa. Tätä infrastruktuuria käytetään tyypillisesti

¹¹⁷ <https://vnk.fi/documents/10616/20764082/hiilineutraaliuden+tiekartta+03022020.pdf>
<https://vnk.fi/documents/10616/20764082/kestavan+verotuksen+tiekartta+03022020.pdf>

¹¹⁸ ASHRAE 2019: Water-Cooled Servers Common Designs, Components, and Processes. White Paper Developed by ASHRAE.

vain sähköverkon häiriötilanteissa datakeskuksen luotettavan sähkönsaannin varmistamiseksi. Suuren datakeskuksen generaattorikapasiteetti on varmennustarpeen vuoksi tyypillisesti suuri suhteessa laitoksen tuotantokuormaan ja datakeskus voi tuottaa merkittävän määrän sähköä nopeasti, hetkellisesti tai pidemmäksi aikaa sähköverkon suuntaan.

Datakeskusten akustojen energiaa sähköverkon suuntaan syöttämällä voidaan vaikuttaa hyvin nopeasti sähköverkon taajuusmuutoksiin ja tukea siten sähköverkon toimintaa. Varavoimageneraattoreilla voidaan hieman pidemmällä viiveellä joko tuottaa sähkö sähköverkkoon tai kytkeä merkittävä määrä kuormaa irti sähköverkosta häiriötilanteen hallitsemiseksi. Näillä järjestelyillä rakennettuja datakeskuksia voi hyödyntää sähköverkon tukena ja välttää erillisinvestointeja säätövoimaloihin.

Varavoimageneraattoreja koskevat ratkaisut

Wärtsilä on kehittänyt kaasukäyttöisiä varavoimageneraattoreita dieselkäyttöisten sijaan. Maakaasun edut verrattuna dieseliin ovat hiukkaspäästöjen puuttuminen sekä alhaisemmat hiilidioksidipäästöt. Myös biokaasun käyttö on mahdollista. Varavoimajärjestelmät voivat myös tukeutua litiumioniakustoihin.

3.7. CASE: Superkonekeskus

Superkoneita varten rakennetun datakeskuksen keskeisin ilmastovaikutus syntyy sen sähkönkulutuksesta. Lisäksi laitteiden ja rakenteiden materiaalit ja niiden kierrätys ovat olennaisia kysymyksiä. Kuten datakeskuksissa yleisesti, järjestelmien energiansaantia ja jäädytystä varten tarvittava sähkö on yleensä myös kallein komponentti, joten sähkönkulutusta pyritään optimoimaan suunnittelulla ja keskusten sijoittelulla.

Suomen ilmasto-olosuhteet vähentävät erityisesti jäähdytykseen tarvittavaa energiaa. Ulkoilma- ja vesijäähdytys vähentävät hukkaenergian tuottoa. Erityisesti lämminvesijäähdytys tarjoaa energiatehokkaan jäähdytysratkaisun. Siinä jäähdytysvesi kiertää suoraan supertietokoneiden sisällä. Jos keskukset on rakennettu alueelle, jossa on valmista kaukolämpöinfrastruktuuria, on myös lämmön talteenottoon edellytykset.

Suomessa Kajaanissa on tällä hetkellä kaksi täysin ulkoilma- ja vesijäähdytteistä superkoneille tarkoitettua konesalia. Vuonna 2021 rakennettava uusi maailmanluokan superkoneelle rakennettava sali on lämminvesijäähdytteinen, ja sen hukkalämpö otetaan talteen kaukolämpöverkkoon.

Akustojen, jäähdytysjärjestelmien, sähkökeskusten sekä erityyppisten putkistojen ja kaapelistojen materiaalin kierrätys on ulkoistettu siihen erikoistuneille laitoksille. Käytettyjen ja vanhenevien tietokonejärjestelmien uudelleenkäytettävyys on hyvin tapauskohtaista. Maailman huippuluokan superkoneiden kustannustehokas elinikä on maksimissaan noin 5–6 vuotta, jonka jälkeen niiden energiatehokkuus on jäänyt huomattavasti uutta tekniikkaa jälkeen.

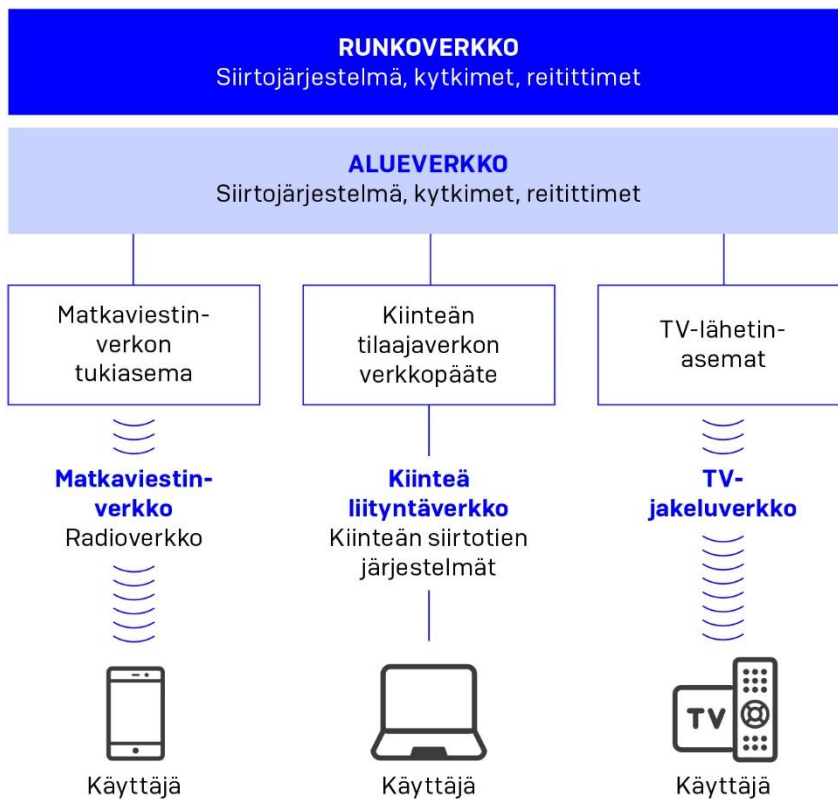
Automaatiolla parannetaan datakeskuksen toimintoja ja prosesseja sekä parannetaan energiatehokkuutta optimoimalla automaation toimintaa siitä kerättyjen tietojen perusteella. Tulevaisuudessa voidaan hyödyntää tekoälyä ja tekoälyn dataa entistä paremmin automaation säädössä sekä laitteistojen elinkaaren hallinnassa. Kunnossapitosuunnitelmilla varmistetaan laitteiden toimivuus, oikea-aikainen huolto ja laitteiden uusiminen.

4. Verkot

4.1. Nykyiset teknologiset ratkaisut

Digitalisoituva yhteiskunta tarvitsee yhä suorituskykyisempiä viestintäverkkoja. Ne muodostuvat joko kiinteää tai langatonta tiedonsiirtoa käyttävistä yhteyksistä sekä erilaisista tiedon kytkentää ja siirtoa hoitavista järjestelmistä. Verkot voidaan jakaa esimerkiksi niiden alueellisen hierarkian (topologian) mukaan kiinteistöjen sisäverkkoihin, liittymäverkkoihin (tilaajaverkko), alueverkkoihin ja runkoverkkoihin. Lisäksi verkot voidaan jakaa yleisiin verkkoihin ja yksityisiin verkkoihin sen mukaan, käytetäänkö verkkoa viestintäpalvelujen tarjontaan ennalta rajaamattomalle käyttäjäpiirille tai ennalta rajatuille käyttäjäpiireille. Viestintäverkon yksinkertaistettu rakenne on esitetty kuvassa 9. Sen tarkoituksena on havainnollistaa tässä luvussa energiatehokkuuden kannalta käsiteltäviä verkkoja ja niiden osia.

Kuva 9: Tietoa voidaan siirtää laajakaistaisen matkaviestinverkon tai kiinteän verkon kautta. Joukkoviestinverkolla tarkoitetaan verkkoa, jota käytetään pääasiassa TV- ja radiosisältöjen välittämiseen.

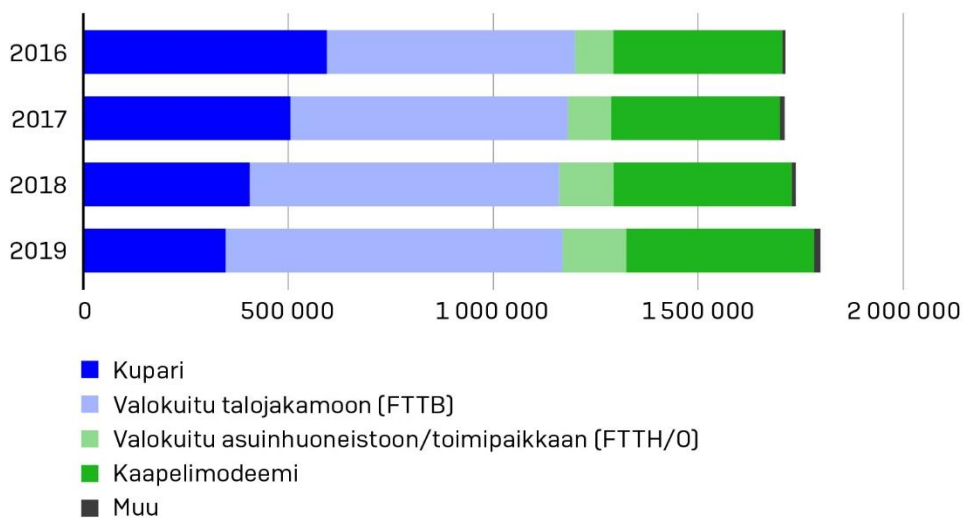


4.1.1. Kiinteät laajakaistayhteydet

Kiinteitä yhteyksiä tarvitaan erityisesti suurta ja ennakoitavaa yhteysnopeutta vaativiin palveluihin. Tällä hetkellä toimintavarmimmat ja nopeimmat kiinteät yhteydet toteutetaan valokuidulla ja ne toimivat myös huippunopeiden langattomien yhteyksien siirtoverkon pohjana. Uusien valokuituyhteyksien rakentaminen jatkuu ja vanhoja kupariyhteyksiä korvataan valokuidulla.

Kiinteän tilaajaverkon kotitalouksien laajakaistaliittymien määrä oli vuoden 2019 lopussa noin 1,53 miljoonaa liittymää ja yrityskäytössä olevien noin 210 000 liittymää. Kasvua liittymien määrässä on aiempiin vuosiin nähden vain vähän. Sen sijaan kiinteän verkon laajakaistaliittymien nopeudet ovat selvässä kasvussa. Tämä johtuu osin siitä, että hitaampia teknologioita korvataan uusilla nopeammilla (kuva 10). Vuoden 2019 lopussa kaikkien kiinteän verkon laajakaistaliittymien määrästä yli 40 % oli välillä 100–300 Mbit/s, kun osuus vuotta aiemmin oli noin 35 % (kuva 11).

Kuva 10. Kiinteän verkon laajakaistaliittymien määrät ovat kasvaneet hitaasti. Valokuituyhteyksien osuus liittymistä on kasvanut. Lähde: Liikenne- ja viestintävirasto Traficom.



Kiinteän verkon laajakaistaliittymä voidaan toteuttaa eri yhteystekniikoilla:

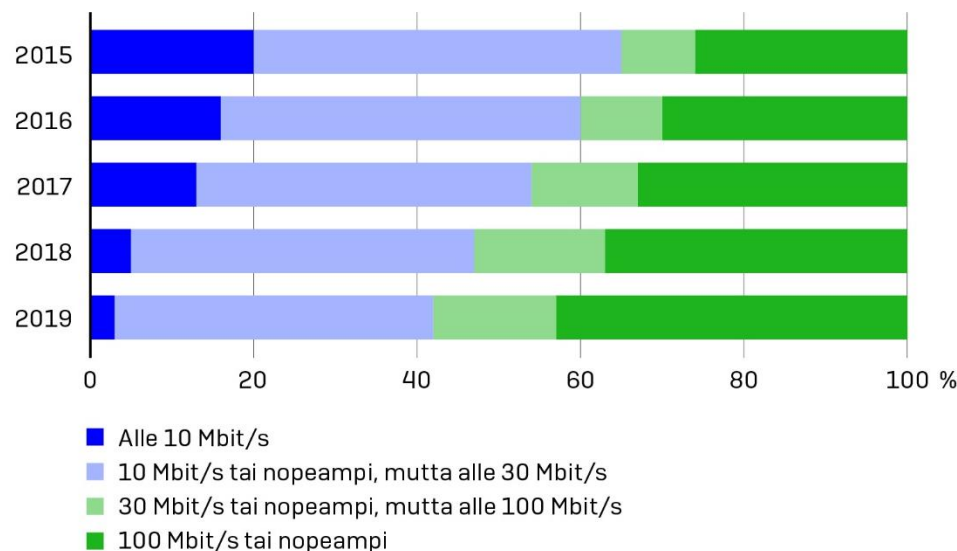
- Kupariliittymät ovat puhelinverkon metallijohtimilla toteutettuja laajakaistaliittymiä. Laajakaistainen digitaalinen tiedonsiirto toteutetaan tällöin niin kutsutulla DSL-modeemilla (Digital Subscriber Line) tilaajan ja verkon liityntälaitteen DSLAM (Digital Subscriber Line Access Module) välillä. Tällä tekniikalla saavutettava suurin tiedonsiirtonopeus riippuu DSL-modeemin tyypistä sekä tilaajayhteyden pituudesta. Esimerkiksi VDSL2-modeemilla (Very High Speed Digital Subscriber Line) voidaan saavuttaa enintään 200 Mbit/s yhteenlaskettu nopeus eri siirtosuuntien välillä (verkosta tilaajalle, tilaajalta verkkoon).¹¹⁹

¹¹⁹ <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.993.2-201902-I/en>

- FTTB (Fiber to the Building) ovat liittymiä, joissa valokuitukaapelointi ulottuu vähintään johonkin samalla tontilla sijaitsevaan rakennukseen. Näissä tapauksissa kiinteistön sisäkaapelointi voi rajoittaa yhteysnopeutta, mutta useimmissa tapauksissa nämä yhteydet mahdollistavat vähintään 100 Mbit/s tiedonsiirtonopeuden.
- FTTH (Fiber to the Home) ovat liittymiä, joissa valokuitukaapelointi ulottuu huoneistoon asti. Tällainen yhteys mahdollistaa vähintään 1000 Mbit/s (1 Gbit/s) tiedonsiirtonopeuden.
- Kaapelimodeemiliittymät on toteutettu kaapelitelevisioverkon avulla ja niillä voidaan saavuttaa 1000 Mbit/s nopeuksia.
- Muut liittymät sisältävät erilaisia radiotekniikan avulla toteutettuja langattomia ratkaisuja, jotka on tarkoitettu käytettäväksi pääosin kiinteässä sijaintipaikassa. Mukaan on laskettu myös sellaiset taloyhtiö- ja kiinteistöliittymät, joita ei ole voitu tilastoida muihin luokkiin.

Kuva 11. Kiinteän verkon laajakaistaliittymien nopeus on kasvanut välillä 2015–2019.

Lähde: Liikenne- ja viestintävirasto Traficom.



4.1.2. Mobiililaajakaistayhteydet

Yleiset matkaviestinverkot perustuvat pääsääntöisesti eurooppalaisen telealan standardointijärjestön ETSI:n ja kansainvälisen telealan järjestön ITU:n määrittelyihin. Uudet laitesukupolvet on nimetty järjestystä kuvaavalla numerolla ja G-kirjaimella (Generation). Jokainen uusi matkaviestinverkon sukupolvi on tarjonnut edelliseen nähden uusia ominaisuuksia ja palveluja, tehokkaampaa tiedonsiirtoa sekä mahdollistanut tiettyjen palvelujen osalta yhteensopivuuden edellisiin sukupolviin.

Suomessa teleoperaattorit ovat rakentaneet 2G-, 3G- ja 4G-verkkoja hyvin laajasti ja lähes maan kattavasti. Uusi 5G-sukupolven verkko on rakenteilla. Valtioneuvosto myönsi 3,5 gigahertsin taajuusalueen verkkotoimiluvat vuoden 2018 lopulla ja 5G-verkkojen rakentaminen käynnistyi vuoden 2019 alussa.

Matkaviestinverkossa tiedonsiirron nopeuteen vaikuttavat monet tekijät, mutta käytännössä 4G-tekniologialla voidaan saavuttaa enintään 50–100 Mbit/s keskimääräisiä tiedonsiirron nopeuksia. Tuloillaan olevalla seuraavan sukupolven 5G -tekniologialla tiedonsiirron maksiminopeudet voivat olla useita Gbit/s.

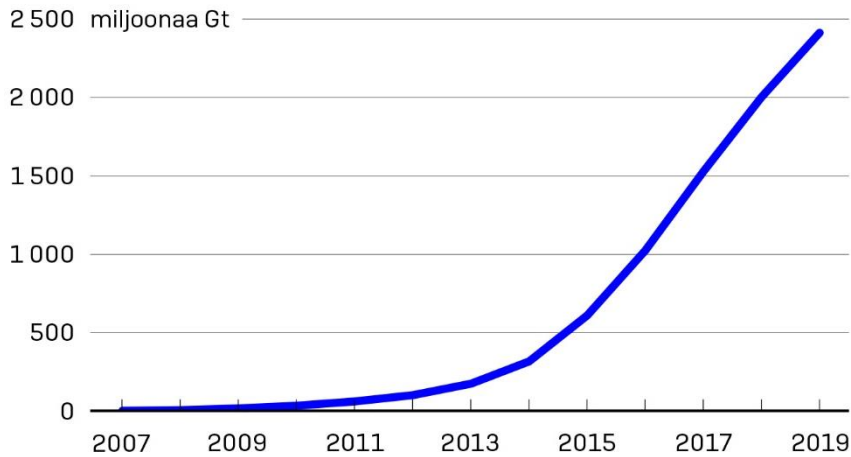
Matkaviestinverkoissa mobiilipäätelaitteen ja radioverkon tukiaseman väliset yhteydet toteutetaan radiotaajuuksilla. Suomen viestintäpoliittisena tavoitteena on ollut osoittaa mahdollisimman paljon taajuuksia langattomalle laajakaistalle tukemaan Suomen asemaa johtavana mobiiliverkkojen kehittäjänä ja käyttäjänä.

Matkaviestinverkko sisältää aina paitsi radioverkko-osuuden myös matkaviestinverkossa käytettäviä kiinteän verkon järjestelmiä. Laajakaistainen matkaviestinverkko edellyttää käytettävästä tekniologiasta riippumatta tukiasemilta huippunopean kiinteän kuitu- tai radiolinkkiyhteyden runkoverkkoon (kuva 9).

Mobiililaajakaistaliittymiä oli Suomessa vuoden 2019 lopussa reilu 2 miljoonaa kappaletta, joista lähes 80 prosenttia oli käytössä kotitalouksissa ja näistä lähes kaikki olivat käytöltään rajoittamattomia (ks. myös luku 2).¹²⁰ Matkaviestinverkossa siirretyn datan määrä on kasvanut Suomessa nopeasti (kuva 12) ajanjaksolla 2007–19.

¹²⁰ Liikenne- ja viestintävirasto: Viestintäpalveluiden tilastotaulukko. Päivitetty 18.3.2020. <https://www.traficom.fi/fi/tilastot>

Kuva 12. Suomen matkaviestinverkoissa siirrettiin vuonna 2019 2,4 miljoonaa gigatavua dataa.



4.2. Verkkojen energiankulutus ja ilmastonäkökohdat

Viestintäverkkojen energiankulutuksen ja energiatehokkuuden seuranta eri ajanjaksoina vaikeuttavat näihin sovellettavien yhtenäisten tiedonkeruukäytäntöjen ja tilastojen puuttuminen. Yksittäisiä tilastoja ja selvityksiä on saatavilla. Yleisesti tiedonsiirtomäärien kasvun nähdään johtavan myös viestintäverkkojen energiankulutuksen kasvuun, joka kuitenkin kompensoituu ainakin osin verkkojen eri laitteiden energiatehokkuuden parantumisella. Energiankulutukseen vaikuttavat uusien energiatehokkuutta lisäävien teknologioiden käyttöönotto lisäksi myös vanhojen laitteiden elinkaari sekä laitteiden modernisointi ennen elinkaaren loppua.

Kansainvälinen energiajärjestö (IEA) arvioi viestintäverkkojen energiankulutuksen olevan noin 185 TWh (vuonna 2015), kun datakeskukset kuluttivat 194 TWh (vuonna 2014). Molempien osuus globaalista sähkönkulutuksesta olisi siten noin 1 %. Mobiili-verkot vastasivat noin kahdesta kolmasosasta verkkojen sähkönkulutuksesta globaalisti. Mobiilidatan siirron yleistymisen ja datan määrän kasvu voi johtaa IEA:n arvion mukaan vuoteen 2021 mennessä tiedonsiirtoverkkojen energiankulutuksen moninkertaistumiseen tai jopa sen vähenemiseen riippuen siitä, miten politiikkatoimin voidaan

vaikuttaa energiatehokkuuteen.¹²¹ Andrae esittää päivitettyssä arviossaan¹²² mobiili-verkkojen kokonaisenergiankäytön noin kolminkertaistuvan 2020-luvun aikana (98 TWh -> 316 TWh) ja kiinteän verkon noin kaksinkertaistuvan (150 TWh -> 284 TWh).

FiComin selvityksen mukaan tietoliikenneverkkojen kokonaissähkönkulutus on Suomessa vuosina 2014-2018 ollut kasvussa. Vuonna 2014 teleoperaattorit käyttivät sähköä noin 506 gigawattituntia, ja vuonna 2018 vastaava luku oli 634. IoT:n ja tekoälyn käytön kasvun sekä niiden dataintensiivisyyden katsottiin olevan energiankulutuksen määrääviä tekijöitä. Myös liikkuvan kuvan välittämisen tietoverkoissa todettiin lisääntyneen huomattavasti.¹²³

Suomessa kiinteä liityntäverkko käytti energiaa vuoden 2019 aikana arviolta 300 gigawattituntia ja matkaviestinverkko arviolta vajaa 500 gigawattituntia. Näihin lukuihin on laskettu mukaan valaistuksen, jäähdytyksen ja lämmityksen muodostama kulutus.¹²⁴

4.2.1. Verkkojen energiatehokkuus

Kiinteän verkon datansiirtomääristä Suomessa ei ole toistaiseksi saatavissa luotettavaa tietoa, mikä vaikeuttaa niiden energiatehokkuuden määrittämistä. Kiinteä verkko on yleisesti ottaen energiatehokkaampi kuin mobiili ja kansainvälisissä lähteissä¹²⁵ päästään tehokkuuksiin 0,0043 kWh/Gt asiakkaan ja operaattorin välisessä yhteydessä ja 0,052 kWh/Gt runkoverkossa.

Mobiilidatan ominaissähkönkulutus eli energiatehokkuus oli FiComin selvityksen mukaan ollut vuonna 2014 noin 1,6 kWh/Gt, kun se vuonna 2018 oli parantunut arvoon 0,3 kWh/Gt.¹²⁶ Vuonna 2015 Viestintäviraston VTT:llä teettämässä esiselvityksessä matkaviestinverkkojen tukiasemien sähkön käytöstä ja energiatehokkuudesta ennakoitiin gigatavua kohden lasketun energiatehokkuuden parantuvan liikennekuormien kasvussa ja kapasiteetin käyttöasteen parantuessa. Selvityksen mukaan operaattorit olivat myös kysyneet tehostamaan suoraa sähköenergian käyttöään vuosina 2011–2014 vapaaehtoisin toimin, vaikka samalla tiedonsiirron määrä oli kasvanut erittäin merkittävästi.

Viestintäverkkojen laitteiden energiankulutus on merkittävä kustannustekijä teleyrityksille ja laitevalmistajille. Tarvittavan tehon määrällä on vaikutuksia verkolle asetettaviin

¹²¹ International Energy Agency 2017: Digitalization & Energy.

¹²² Andrae 2020: Hypotheses for primary energy use, electricity use and CO₂ emissions of global computing and its shares of total between 2020 and 2030. WSEAS Transactions on Power Systems.

¹²³ <https://www.ficom.fi/ajankohtaista/uutiset/digitalisaatio-auttaa-energiatehokkuudessa---ja-tarvitsee-siihen-sahkoo>

¹²⁴ Liikenne- ja viestintäviraston suurimmille teleyrityksille tehty tiedonkeruu, kevät 2020.

¹²⁵ Schien ym. 2015: The Energy Intensity of the Internet: Edge ja Core Networks. ICT Innovations for Sustainability.

¹²⁶ <https://www.ficom.fi/ajankohtaista/uutiset/digitalisaatio-auttaa-energiatehokkuudessa---ja-tarvitsee-siihen-sahkoo> - julkaisussa yksikkö kWh/Tt, mutta tämä on muun tiedon varassa tulkittavissa yksikkövirheeksi.

vaatimuksiin, kuten varavoimakapasiteetin suuruuteen sekä laitetiloihin ja niiden jäähdytykseen. Energiankulutuksen voi siis olettaa olevan keskeinen vaikutin laitehankinnoissa ja verkkojen suunnittelussa. Energiatehokkuuden parantamisyrittämissä on toisaalta tärkeänä pidetty sitä, ettei toimenpiteillä hidasteta laajakaistakehitystä eikä vaaranneta palvelutasotavoitteiden toteutumista.¹²⁷

Viestintäverkon eri järjestelmien, laitteiden ja -komponenttien energiankulutuksesta ja energiatehokkuudesta on saatavilla melko vähän sellaista koottua uutta tietoa, jonka avulla pystytään yksiselitteisesti arvioimaan tai vertailemaan eri verkkolaitteiden välistä energiankulutusta. Myös itse verkon ja sen eri osien energiankulutuksen arviointi suhteessa tietyn käytetyn palvelun päästä päähän kokonaisenergiankulutukseen on haastavaa internetiin kytketyissä palveluissa, koska palveluiden tuottamiseen tarvitaan niin yleisiä viestintäverkkoja kuin yritysten ja organisaatioiden yksityisiä verkkoja ja näiden yhdistelmiä.

Verkon ja datakeskuksen välinen ero on jossain määrin hämärtyvässä, koska uusien verkkoteknologioiden sekä palvelujen toteuttamiseksi laskentaa ollaan osin siirtämässä keskitetyistä datakeskuksista yhä lähemmäs verkon reunaa. Tämän lisäksi tietyn palvelun toteutukseen liittyy sen tarjoajan infrastruktuurissa usein varsinaisten palvelimien lisäksi mittava määrä verkon komponenteiksi katsottavia verkkolaitteita, kuten reitittimiä ja kytkimiä. Tämä tarkoittaa myös sitä, että verkkojen ja datakeskusten energiakulutuksen välille ei voida aina vetää selvää rajaa.

Verkkoteknologian kehitys on myös erittäin nopeaa, jolloin verkon eri osia ja jopa arkkitehtuuria uusitaan muun muassa verkon suorituskyvyn, palvelujen kapasiteettivaatimusten ja käyttäjien sovellustarpeiden perusteella. Näin ollen verkkojen ja niiden osien ominaisuudet myös energiatehokkuuden kannalta voivat vaihdella suuresti.

Alla tarkastellaan muutamien verkkojen osalta energiatehokkuuteen liittyviä tekijöitä.

Kiinteät laajakaistaverkot

Viestintäviraston siirtojärjestelmät-työryhmässä selvitettiin vuosien 2011–2012 välisenä aikana liikenne- ja viestintäministeriön pyynnöstä viestintäverkkojen energiankulutusta ja eri siirtotekniikoitten energiatehokkuutta (W/Mbps).¹²⁸ Selvityksen mukaan esimerkiksi liittymäverkon kupariyhteyksiä käyttävän DSL-tekniikan käyttäjäkohtainen tehonkulutus lähetys- ja paluusuunnan siirtonopeudella 10 Mbit/s näytti olevan silloisten tavoitearvojen valossa alle 10W/käyttäjä. Tuoreimpaan, vuodelta 2017 peräisin olevaan EU:n *Code of Conduct* -dokumenttiin perustuvien tavoitearvojen mukaan tehonkulutus olisi tästä karkeasti puolittunut. DSL-tekniikalla tehonkulutus ja täten myös energiatehokkuus riippuu kuitenkin suuresti tilaajayhteyden pituudesta ja siirrettävän tiedonsiirron nopeudesta, joten tehonkulutus voi käytännössä olla suurempikin.

¹²⁷ Viestintävirasto, 2012: Laajakaistaisten viestintäverkkojen energiatehokkuus. Viestintäviraston siirtojärjestelmät-työryhmän muistio.

¹²⁸ Viestintävirasto, 2012: Laajakaistaisten viestintäverkkojen energiatehokkuus. Viestintäviraston siirtojärjestelmät-työryhmän muistio.

Selvityksessä todettiin myös, että kiinteän laajakaistan energiavertailussa on usein käytetty suhdelukua 1:10 eli verkon liityntälaite DSLAM kuluttaa noin 1/10 siihen liitettyjen kotipäätelaitteiden ja modeemien tarvitsemasta energiasta. Samoin todettiin, että kodin päätelaitteiden (tietokone, televisio) energian kulutus on jo noin 2–3 tunnin päivityksellä käytöllä huomattavasti suurempi kuin verkkopäätteiden energian kulutus.

Kiinteän tilaajaverkon muilla tekniikoilla (optinen verkko, kaapelitelevisioverkko) toteutetuissa liittymissä tarvittavien laitteiden energiankulutus käyttäjää kohden ei näyttäisi merkittävästi poikkeavan DLS-tekniikkaan verrattuna käytetyllä 10Mbit/s siirtonopeudella. Tätä tukee myös vuonna 2011 tehty tutkimus, jossa verrattiin tehonkulutusta käyttäjää kohti eri tekniikoilla ja eri nopeuksilla.¹²⁹ Siinä todettiin muun muassa, että kaapelitelevisioverkon HFC-tekniikan (Hybrid Fiber Coaxial) käyttäjäkohtainen tehonkulutus on noin 8 W/käyttäjä, mutta lähtee nopeasti nousuun liityntänopeuden kasvaessa yli 20 Mbps. DSL-järjestelmien tehonkulutuksen todettiin olevan yleensä optisia järjestelmiä pienempi, mutta toiminta-alue ulottui silloin vain noin 20 Mbit/s suuruusluokkaan. Kiinteän tilaajaverkon optisten järjestelmien todettiin olevan selvästi muita siirtoteknologioita energiatehokkaampia erityisesti suurilla liityntänopeuksilla.

Käytännössä tilaajapään verkkolaitteet ovat harvoin jatkuvasti käytössä. Kun laite ei ole varsinaisessa suoritustilassa, se ohjataan vähemmän tehoa kuluttavaan lepotilaan, jolloin energiankulutus on jonkin verran pienempi.

Varsinkin alue- ja runkoverkoissa käytetään varsinaiseen tiedonsiirtoon tarkoitettujen järjestelmien lisäksi kytkimiä ja reitittäjiä, joiden tehtävänä ohjata siirrettävät datakehukset tai -paketit oikeisiin kohteisiinsa. Kytkein kytkee siirrettäviä datapaketteja yleensä saman organisaation hallinnoiman verkon sisällä olevien laitteiden fyysisten porttien välillä ja reititin puolestaan reitittää nimensä mukaisesti siirrettäviä datapaketteja myös eri organisaatioiden hallinnoimien verkkojen välillä. Käytännössä sama laite voi olla sekä kytkävä että reitittävä (taso 2/3) tai pelkästään reitittävä (taso 3).

Erään tutkimuksen mukaan vuonna 2017 tason 2/3 laitteiden osuus isoissa yritysverkoissa on jatkuvasti kasvanut.¹³⁰ Myös yleisten verkkojen alue- ja runkoverkoissa tämä kehitys on ollut nähtävissä.¹³¹ Näiden tehonkulutusta vertailtaessa on päädytty kuvassa 13 esitettyihin suhteisiin.¹³² Tutkimusten johtopäätöksenä oli, että tehonkulutuksen kannalta verkoissa tulee pyrkiä välttämään signaalien prosessointia ylemmillä tiedonsiirron ohjaukseen käytettävillä protokollatasoilla. Optinen tiedonsiirto näyttää näiden tutkimusten perusteella energiatehokkaimmalta verkkoteknologialta.

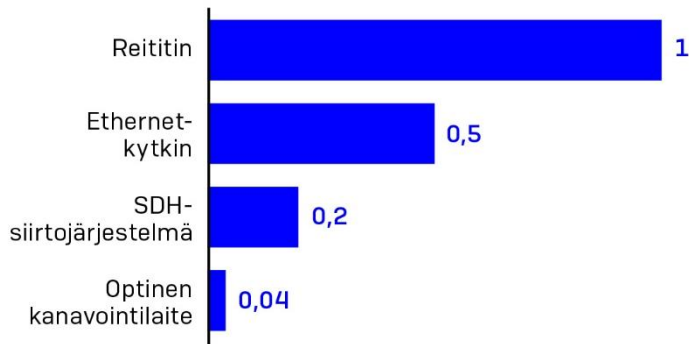
¹²⁹ Baliga ym., 2011: Energy Consumption in Wired and Wireless Access Networks. IEEE Communications Magazine.

¹³⁰ https://greenelectronicscouncil.org/wp-content/uploads/2019/04/20190401_GEC_TÜV_LNE_Final_Clean.pdf

¹³¹ Viestintävirasto, 2012: Laajakaistaisten viestintäverkkojen energiatehokkuus. Viestintäviraston siirtojärjestelmät-työryhmän muistio.

¹³² Di Giglio ym., 2011: Green features of STRONGEST Vision, rationale and status. STRONGEST workshop Pisa.

Kuva 13: Verkkolaitteiden tehonkulutus on korkeampi ylemmillä tiedonsiirron ohjaukseen käytettävillä tasoilla.



Laajakaistaiset matkaviestinverkot

Tyypillisesti matkaviestinverkkojen energiankulutuksesta yli 80 % tapahtuu sen radioverkon osissa, ja yleisesti ottaen radioverkon osuus koko mobiiliverkon kulutuksesta on viime vuosina kasvanut.

Maailman ensimmäinen 2G GSM -verkko otettiin käyttöön Suomessa vuonna 1991. Verkkojen energiatehokkuus on siitä lähtien kasvanut voimakkaasti jokaisen uuden teknologiapolven myötä. 3G-teknologiaan verrattuna 4G on noin 10 kertaa energiatehokkaampi. Kansainvälinen televiestintäliitto ITU on määritellyt 5G-teknologian standardisoinnin tavoitteeksi 100-kertaisen energiatehokkuuden (t/J) 4G-teknologiaan verrattuna. Suosituksen ITU-R M. 2083-0 (2015) mukaan radioverkon energiankulutus ei saisi kasvaa 5G:hen siirryttäessä verkkojen kapasiteetin kasvusta huolimatta. Tämän on arvioitu jopa mahdollistavan historiallisen irtikytkennän bruttokansantuotteen kasvun ja hiilidioksidipäästöjen välillä. 5G:n edellyttämä tiheämpi tukiasemaverkko verrattuna 4G-teknologiaan tuo kuitenkin omat haasteensa kokonaisenergiankulutuksen kannalta.

5G-teknologiaa standardoi telealan eri standardisointiorganisaatioita yhdistävä yhteistyöorganisaatio 3GPP. Ensimmäinen 5G-standardiversio *Release 15* valmistui vuonna 2019 ja seuraava versio *Release 16* on valmistumassa vuoden 2020 toisella puoliskolla. Teknologian kehitystyö jatkuu myös tämän jälkeen ja siihen lisätään jatkuvasti uusia teknisiä toiminnallisuksia. 5G-standardit sisältävät monia uusia ominaisuuksia, jotka muun muassa kasvattavat yhteysnopeuksia, pienentävät yhteysviiveitä ja mahdollistavat erittäin suuren määrän verkkoon kytkettäviä laitteita sekä ominaisuuksia, jotka on suunniteltu pienentämään päätelaitteiden energian kulutusta. Myös ominaisuuksia, jotka on kehitetty aiempiin 2G, 3G ja 4G -verkkoihin voidaan pääsääntöisesti käyttää myös uusissa 5G-verkoissa.

Kehittyvät ja erittäin suorituskykyiset verkot mahdollistavat suuremmat datanopeudet ja verkoissa siirretyn datan määrän kasvun, mikä haastaa energiatehokkuuden parane-
mista. Vanhojen teknologioiden säilyessä käytössä uusien rinnalla ei energiatehokkuu-
den lisääntymisestä myöskään saada irti kaikkia hyötyjä. Myös ruuhkautuminen lisää
verkkojen kuluttaman energian määrää.

Antennitelevisioverkot

TV-jakeluverkon liityntäteknologioiden eli kuluttajan käyttämät laitteet ja teknologiat muodostavat merkittävän osuuden palvelun kokonaisenergiakulutuksesta (jopa 70 %¹³³). Liityntäteknologiat ovat monikanavaisen TV-jakelun osalta seuraavat:

- Antenni- ja kaapeli-TV-lähetyksen katselu television avulla
- Tilausvideoiden katselu internet-yhteydessä olevan television avulla
- Tilausvideoiden katselu tietokoneen kautta
- Tilausvideoiden katselu mobiililla päätelaitteella (Puhelin, Ipad)

Suomessa UHF-taajuusalueella toimivien antennitelevisioverkkojen operoinnista vastaa Digita. Niiden keskimääräinen sähkönkulutus on ollut viime vuosina 27 000 MWh tiedonsiirtomäärän (kuva, ääni) ollessa vuonna 2019 aikana 34 miljoonaa gigatavua. Maanpäällisessä TV-jakeluverkossa välitetään kotitalouksiin 22–160 Mbit/s ympäri vuorokauden.

Maanpäällisen TV-jakeluverkon osuus vastaanotossa kaikista TV-kotitalouksista on ollut viime vuosina arvioiden mukaan 48–50 %. Maanpäällisen televisioverkon vastaanottoa pääasiallisena vastaanottotienä käyttäviä kotitalouksia on 1,216 miljoonaa¹³⁴ ja näissä kotitalouksissa keskimäärin 1,7 TV-vastaanotinta. Mikäli vastaanottimelle asetetaan sähkönkulutusarvoksi 150 W, ja yhdistetään siihen tieto siitä, että televisiota katsellaan keskimäärin 2h 42 min päivässä, saadaan 173 000 MWh. Näiden tietojen perusteella maanpäällisen television jakeluverkon prosentuaalinen osuus monikanavaisessa tv-jakelussa olisi noin 15 % liityntäteknologian ja ydin- ja kuljetusverkon muodostamasta kokonaissähkönkulutuksesta. Huomioitava on, että antennitelevision vastaanottoon käytettävää laitetta pystytään hyödyntämään muidenkin jakeluteiden vastaanottamisessa.

Antenni-TV:n jakeluverkon ja yleiskäyttöisten tiedonsiirtoverkkojen oleellisin ero energiatehokkuudessa liittyy verkkojen erilaiseen topologiaan ja käyttötapaan. TV-jakeluverkot on suunniteltu käytettäväksi ns. kiinteässä vastaanotossa (kiinteä vastaanottoantenni rakennuksen katolla) ja yksisuuntaisina lineaarisen mediajakelun tarpeista lähtien. Verkko kokonaisuudessaan erittäin energiatehokas välityskykynsä ja käyttäjäpotentiaalinsa nähdessä.

Kuten muidenkin jakeluverkkojen, on myös joukkoviestinverkkojen ja erityisesti antenni-TV:n jakeluverkon energiatehokkuus kasvanut Suomessa merkittävästi verkkoon

¹³³ <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2015/VTT-CR-01429-15.pdf>

¹³⁴ <https://www.finnpanel.fi> <https://www.finnpanel.fi/tulokset/tv/vuosi/sharev/viimeisin/>
https://www.finnpanel.fi/lataukset/tv_vuosi_2020.pdf

tehtyjen investointien ja laitteiden- ja järjestelmien teknologiauudistusten myötä viimeisen 10 vuoden aikana. TV-jakeluverkoissa energiatehokkuutta kasvattaa:^{135,136}

- Teknologiasiirtymä DVB-T -tekniikasta DVB-T2:een, mikä vähentää lähetyksverkossa kulutetun energian määrää välitettyä datamäärää kohden paremman kapasiteetin ansiosta.
- Kuvan ja videon koodausmenetelmien kehittyminen (esimerkiksi H.264, H.265), mikä mahdollista paremman kuvanlaadun vähemmällä siirretyllä datamäärällä.
- Siirtoverkon teknologiasiirtymä (SDH-tekniikasta IP-pohjaiseen tiedonsiirtoon), mikä koodausmenetelmien kehittymisen kanssa mahdollistaa tiedonsiirtokapasiteetin optimoinnin tiedonsiirtotarpeiden mukaan. IP-pohjaisissa tiedonsiirtoratkaisuissa siirtyminen Unicast-jakelusta Multicast-jakeluun tiedonsiirtoverkkoa operoivan toimijan puolesta mahdollistaa myös lisäyksen energiatehokkuuteen välitettyä datamäärää kohden.
- Lähetyksjärjestelmissä virtalähde- ja vahvistinasteiden komponenttien parantunut hyötysuhde, mikä mahdollistaa TV-lähetyssignaalin tuottamiseen kuluvan energiamäärän pienentymisen välitettyä datamäärää kohden.
- Taajuuksien tehokas käyttö antenni-TV -jakeluverkossa hyödyntäen suurteholähtämistä ja maankattavaa korkeiden mastojen lähetyksasemaverkostoa sekä laajoja SFN-ratkaisuja (saman taajuuden verkot, Single Frequency Networks).

Energiakulutus on lähetyksasemakohtainen TV-jakeluverkon parametreista, verkon peittoalueista, radiolupa- ja viranomaismääräyksistä johtuen sekä asiakassopimuksien vuoksi. Maanpäällisen TV-jakeluverkon merkittävyys yhteiskunnan poikkeusoloissa vaatii jakeluverkolta erityisiä varmistustoimenpiteitä sekä verkko- että lähetyksasematasolla, mikä vaikuttaa energiatehokkuuteen.

Analogisen radion verkot

Analogisen radion jakeluverkko on joukkoviestintäverkko, joka toimii tehokkaasti jaettaessa audiosisältöä laajalle maantieteelliselle alueelle. Tällä hetkellä Suomessa on käytössä 968 analogisen radion lähetintä valtakunnallisissa, alueellisissa sekä paikallisissa radioverkoissa. Käytössä oleva lähetinmäärä on kasvanut vuodesta 2012 alkaen noin 4 % vuodessa. Kasvua rajoittaa jatkossa käytettävissä olevien vapaiden taajuuksien määrä. Antennitelevisioverkkojen ohella myös radion verkkojen energiatehokkuus on tehtyjen investointien ja laitteiden sekä järjestelmien uudistamisen myötä parantunut vuosien mittaan. Pidemmällä tähtäimellä radiojakelu siirtynee mediankäytön muutosten myötä yhä enemmän laajakaistaverkkoihin.

¹³⁵ <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2015/VTT-CR-01429-15.pdf>

¹³⁶ <https://www.gatesair.com/documents/news/Transmitter-Systems-Efficiency-and-TCO-BBR4-GA.pdf> https://www.rohde-schwarz.com/lt/product/thu9evo-productstartpage_63493-313345.html

4.2.2. Standardisointi ja kansainvälinen yhteistyö

Viestintäverkkojen ilmasto- ja ympäristövaikutuksiin liittyvät kysymykset, kuten energia-tehokkuus ja laitteiden elinkaaren hallinta ovat olleet jo pitkään esillä myös kansainväli- sessä standardoinnissa. Aihealuetta on tarkasteltu hyvinkin laajasti muun muassa kv. televiestintäliitossa ITU:ssa sekä EU:ssa.^{137,138,139} Euroopan komission päivittämä ICT:n standardointia käsittelevä suunnitelma 2019¹⁴⁰ sisältää myös ICT:n ympäristövaikutuk- siin liittyvän osuuden ja siihen liittyvän politiikan ja lainsäädännön tavoitteet, ehdotetut toimenpiteet sekä standardointiaktiviteetit. Poliittikatavoitteissa todetaan keskeiseksi haasteeksi ICT-laitteiden ja palvelujen ympäristövaikutuksiin liittyvien tietojen läpinäky- vyyden saavuttaminen sekä tältä osin tehokkaan perustan luomisen kilpailulle.

Komission suunnitelmissa viestintäverkkoihin liittyvänä toimenpide-ehdotuksena tode- taan globaalien mittareiden (KPI) määrittely kiinteän ja mobiilin liityntäverkon sekä run- koverkon energian hallinnalle. Useilla standardointiorganisaatioilla todetaan olevan rooli ja akviteetteja energiatehokkuuden mittareiden määrittelemiseksi sekä näiden mit- taamiseksi ja monitoroimiseksi. Erityisesti ETSI:n standardien todetaan kattavan hyvin eri verkkotyyppien ja verkon osien suunnittelun energiatehokkuuden näkökulmasta sekä tarjoavan työkaluja verkkojen energian hallinnan monitoroinnille.

Komission taajuuspolitiikan kehittämistä avustava korkean tason neuvoa antava ryhmä RSPG (Radio Spectrum Policy Group) on keväällä 2020 perustanut uuden työryhmän, jonka tarkoituksena on tunnistaa ilmastomuutokseen liittyviä näkökulmia taajuuksien käytön kannalta. Lisäksi tarkoituksena on selvittää, miten taajuuksien käyttö voi auttaa ilmastomuutoksen hillitsemisessä. Näiden selvitysten kautta tuotetaan EU-tason suo- situksia. Myös sähköistä viestintää käsittelevä eurooppalaisten regulaattoreiden yhteis- työelin Berc (Body of European Regulators for Electronic Communications) on aloitta- nut uuden Sustainability-ryhmän. Suomea näissä ryhmissä edustaa Liikenne- ja vies- tintävirasto Traficom.

¹³⁷ ITU-T, 2012: Recommendation Y.3021 Framework of energy saving for future net- works. <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3021-201201-I/en>

¹³⁸ Euroopan komissio, 2017: EU Code of Conduct on Energy Consumption of Broad- band Equipment. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repo- sitory/bitstream/JRC106039/ictcoc-ecbe-v6_feb_2017_final.pdf

¹³⁹ ITU-R, 2015: Recommendation M.2083-0 (09/2015) IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond.

¹⁴⁰ Euroopan komissio, 2019: Rolling Plan for ICT Standardisation.

4.3. Verkkojen käyttö, rakentaminen ja purkaminen, kierrättäminen

4.3.1. Elinkaaren hallinta yleisesti

Verkkojen suurin ympäristövaikutus tulee niiden käytönaikaisesta energiankulutuksesta. Esimerkiksi matkaviestinverkkojen laskennallisista elinaikaisista hiilidioksidipäästöistä noin 93 % tulee niiden käytön aikana, 7 % tuotannossa mukaan lukien komponentit ja materiaalit sekä 1 % logistiikassa. Käytönaikaisen päästön osuus on viime vuosina hitaasti kasvanut.¹⁴¹ Käytönaikaiset hiilidioksidipäästöt riippuvat kulutetun sähkön määrästä sekä kulutetun sähkön päästökertoimesta (ks. 2.2.3 sekä 4.3.2).

ICT-verkkojen kuten muidenkin ICT-laitteiden ja -palvelujen ilmasto- ja ympäristövaikutusten isoa kuvaa tulisi tarkastella näiden koko elinkaaren näkökulmasta alkaen suunnittelusta ja päätyen niiden purkamiseen ja kierrättämiseen. Kansainväliset standardit ja suositukset, kuten kansainvälisen televiestintäliiton suositus ITU-T L.1401 antavat hyvinkin yksityiskohtaiset ohjeet ja määrittelyt ICT-verkkojen eri osien ilmasto- ja ympäristövaikutusten hallinnalle ja vaikutusten raportoinnille.

Kasvihuonepäästöjen raportoinnissa tulisi käydä ilmi päästöjen osuus verkon materiaalihankintojen, rakentamisen, käytön ja purkamisen osalta. Käytännössä näin kattavia raportointeja ei ole saatavilla.

4.3.2. Teleyritysten energiankulutus- ja hiilijalanjälkiraportointi

Suomessa toimivien kolmen suurimman teleyrityksen vuoden 2019 ympäristövastuuraporttien perusteella kaikki raportoivat ainakin yleisellä tasolla verkkojen elinkaareen liittyvistä päästöistään. Raporttien perusteella ei voida tehdä eri yritysten suhteen vertailukelpoisia päätelmiä eikä tarkkoja arvioita verkkojen ja niiden elinkaaren vaiheiden osuuksista kasvihuonepäästöissä. Teleyritysten ympäristövastuuraporteissa tietoja esitetään kuitenkin jossain määrin *Greenhouse Gas* (GHG) protokollan¹⁴² laskentaperiaatteiden mukaisesti, jolloin kasvihuonepäästöt voidaan ilmoittaa seuraavan luokittelun mukaisesti:

- Scope 1: Yrityksen suorat (omat) päästöt
- Scope 2: Yrityksen ostetusta energiasta aiheutuvat päästöt
- Scope 3: Yrityksen muut epäsuorat päästöt

DNA:n ympäristövastuuraportissa todetaan sen asettavan ilmastoystävällisen liiketoimintansa tavoitteiksi energiankulutuksesta aiheutuvien päästöjen (Scope 2) vähentä-

¹⁴¹ https://www.nokia.com/sites/default/files/2020-03/Nokia_People_and_Planet_Report_2019.pdf

¹⁴² <https://www.wri.org/publication/greenhouse-gas-protocol>

misen 100 %:lla vuoteen 2023 mennessä vuoden 2014 tasolta. Lisäksi yritys tulee tarkentamaan merkittävimpien tuotekategorioidensa päästölaskentaa ja asettavansa sen pohjalta Scope 3 -ilmastotavoitteen.

Vuonna 2019 DNA:n energiankulutuksesta aiheutuvat epäsuorat päästöt (Scope 2) olivat 13 400 tonnia eli 25 prosenttia vähemmän edellisvuoteen verrattuna. Vuodesta 2014 DNA:n Scope 2 -päästöt ovat vähentyneet noin 55 prosenttia, mikä johtuu uusiutuvan energian käytöstä sekä radioverkon energiatehokkuuden kehittämisestä. Vuonna 2019 sähköenergian hankintaan (Scope 2) liittyvien lähtötietojen tiedonkeruumenetelmää tarkennettiin vertailukelpoisuuden parantamiseksi. Raportoidut Scope 2 -päästöt perustuvat sekä mittaukseen että arviointiin. Yhtiö ilmoittaa ostamansa uusiutuvan energian olevan alkuperätodistettua ja tuotettu vesi- ja tuulivoimalla.

Elisa ilmoittaa tavoitteenaan muun muassa vähentää energiankulutuksensa hiilijalanjälkeä 50 prosenttia vuoteen 2025 mennessä vuoden 2016 tasosta.¹⁴³ Vuonna 2019 Elisan hiilijalanjäljeksi ilmoitetaan 4 806 t CO₂. Scope 1 ja 2 hiilijalanjälki oli Elisan mukaan vähentynyt vuodesta 2016 noin 63 %. Yritys on mukana Suomen energia- ja ilmastostrategian osana olevia energiatehokkuussopimuksissa.

Elisan mukaan uuden teknologian ja mobiiliverkkojen optimoinnin avulla sähkönkulutus datatavua kohden on pienentynyt yli 65 % vuodesta 2015. Siirretyn mobiilidatan energiatehokkuuden Elisa ilmoittaa olleen 2019 0,2 kWh/Gt, kun se vuonna 2016 oli 0,6 kWh/Gt.

Telia raportoi ympäristöraportissaan¹⁴⁴ sen koko arvoketjunsä kattavan hiilijalanjäljen olleen vuonna 2019 noin 250 000 t CO₂e. Tästä Telian omat päästölähteet (Scope 1) *Greenhouse Gas* (GHG) protokollan laskentaperiaatteiden mukaisesti laskettuna katsoivat 0,4 % ja ostoenergian aiheuttamat päästöt (Scope 2) noin 1 % kokonaispäästöistä. Suurin osa eli noin 98 % Telian päästöistä muodostuu muista epäsuorista päästöistä (Scope 3) eli ostetuista tuotteista ja palveluista sekä myytyjen tuotteiden ja palvelujen käytön aiheuttamista päästöistä. Myytyjen tuotteiden ja palvelujen käytön aikaiset päästöt aiheuttavat Telialla noin viidesosan arvoketjujen kokonaispäästöistä. Noin kymmenesosa päästöistä muodostuu tuotantohyödykkeiden, pääosin verkkolaitteiden valmistuksenaikaisista päästöistä.

Telia on liittynyt energiatehokkuussopimukseen vuosille 2017–2025 ja sitoutunut parantamaan energiatehokkuuttaan 7,5 % vuoteen 2025 mennessä vuoden 2015 lähtötasosta. Vuonna 2019 se saavutti 6,6 % energiansäästön.

Yritysten ympäristövastuuraporteissa viestintäverkkojen sähkönkulutuksen tai päästöjen osuutta koko kulutuksesta ei ole eritelty. Raportit painottuvat energiatehokkuuden kehityksen ja laskettujen päästöjen tarkasteluun, energiankulutuksesta tietoa on niukemmin.

¹⁴³ https://corporate.elisa.fi/attachment/elisa-oyj/annual-report-2019/Elisa_Vastuulisuusraportti_2019.pdf

¹⁴⁴ <https://www.telia.fi/telia-yrityksena/yritysvastuu/ymparistovastuu>

4.3.3. Laitteiden ja materiaalien kierrätys

Jätettä, kuten sähkö- ja elektroniikkajätettä (SER) tai vaikkapa poistettua asfalttia syntyy verkkojen rakentamisesta, ylläpidosta ja päivittämisestä. Syntyvien jätteiden määrää voidaan vähentää uusiokäyttämällä laitteita ja kierrättämällä materiaaleja. Yleisimmin yritykset toimittavat jätteet niiden käsittelyyn erikoistuneille yrityksille, jotka huolehtivat niiden asianmukaisesta käsittelystä ml. kierrätettäviksi soveltuvien jakeiden uusiokäyttöön ohjaaminen. Laitevalmistajat voivat edistää laitteiden ja materiaalien uusiokäyttöä vastaanottamalla käytettyjä laitteita ja ohjaamalla niitä uudelleenkäyttöön ja kierrätykseen.

Keväällä 2020 tehdyn kyselyn mukaan Suomessa kiinteän verkon aktiivisista ja passiivisista verkkokomponenteista kierrätetään arviolta ¾. Tähän on laskettu kaikki kaapelointi ja siihen liittyvät elementit mukaan lukien esimerkiksi suojaputket. Matkaviestinverkon tukiasemakomponenteista ja tukiasemia varten rakennetusta infrastruktuurista teleyritykset kierrättävät arviolta yli puolet – toimijoiden arviot kierrätysmääristä vaihtelevat kuitenkin merkittävästi.¹⁴⁵

Teleyritysten arviot verkkokomponenttien ja laitteiden käyttöiästä niin ikään vaihtelevat. Matkaviestinverkossa aktiivilaitteiden käyttöiäksi arvioidaan keskimäärin 7–10 vuotta ja passiivilaitteiden käyttöiäksi arvioidaan keskimäärin 10–20 vuotta. Matkaviestinverkon aktiivisten elementtien kehitys pilvipohjaisiksi lyhentää näiden käyttöikää. Kiinteän verkon puolella kupariverkkojen komponenttien käyttöikä on arviolta keskimäärin 10–25 vuotta ja valokuituverkon komponenttien keskimäärin 10–20 vuotta.¹⁴⁶

Ohjelmistojen päivitettävyyden nopean kehityksen vuoksi oleellista. Kiertotalousajattelua mobiiliverkoissa voidaan hyödyntää seuraavin keinoin:

- Laitteiden suunnittelu: komponenttien ja materiaalien valinta, merkintä, purettavuus
- Laitteiden eliniän pidennys: ohjelmistojen *'no touch'* päivitettävyyden
- Laitteiden huollettavuus: valmistajien tarjoamat huoltopalvelut 24/7
- Laitteiden, moduulien ja komponenttien uudelleenkäyttö sekä laitteiden takuukorjaus uusiokäyttöön (esimerkiksi Nokia ohjasi uudelleenkäyttöön 56 300 laitetta/osakokoonpanoa vuonna 2019)
- Materiaalien vastuullinen kierrätys (esimerkiksi Nokia kierrätti 4000 tonnia vuonna 2019, josta 91,6 % uusiokäytettiin materiaalina ja 7,7 % energiana)

¹⁴⁵ Liikenne- ja viestintäviraston suurimmille teleyrityksille tehty tiedonkeruu, kevät 2020.

¹⁴⁶ Liikenne- ja viestintäviraston suurimmille teleyrityksille tehty tiedonkeruu, kevät 2020.

4.4. Tulevaisuuden verkkoteknologioiden rooli

5G-verkkojen käyttöönoton rinnalla on jo aloitettu 6G-tutkimus. Suomen Akatemia toukokuussa 2018 nimittämä Oulun yliopiston vetämä 6G lippulaiva¹⁴⁷ on ottanut suunnannäyttäjän roolin kansainvälisessä 6G-tutkimuksessa, mikä on mahdollisuus koko Suomen ICT-alan pitkän aikajänteen kehitykselle. 6G lippulaivan vuoteen 2030 tähtäävän vision¹⁴⁸ perustana on dataohjautuva tulevaisuuden yhteiskunta, jonka mahdollistajana toimivat lähes reaaliaikaiset ja rajattomat langattomat tiedonsiirtoyhteydet.

6G:n laajamittaisen käyttöönoton arvioidaan ajoittuvan 2030-luvun alkupuolelle.

4.4.1. 6G-verkkoarkkitehtuuri

Nykyinen verkkoinfrastruktuuri kehittyy jatkuvasti ja sen käyttö jatkuu myös tulevaisuudessa, mutta rinnalle ovat tulossa arkkitehtuuriltaan uudenlaiset 6G-verkkoratkaisut. Tulevaisuuden 6G-verkko¹⁴⁹ on palvelualusta, joka hyödyntää tiedonsiirron lisäksi useita muita palveluja, joilla voidaan muun muassa yhdistää virtuaalisen maailman sisältöjä fyysiseen maailmaan. Tiedonsiirtopalvelun yhdistäminen esimerkiksi laskenta-, paikannus, 3D-mallinnus-, kuvannus- ja muihin sensorointipohjaisiin palveluihin liitetyn pääsyyn paikalliseen kontekstipohjaiseen dataan tulee mahdolliseksi 6G-verkoissa. Tämä avaa oven täysin uudenlaisten palveluiden kehittämiselle.

5G-verkoissa alkanut verkkojen virtualisointikehitys jatkuu 6G:ssä, mikä mahdollistaa yleiskäyttöisen laskentalaitteiston laajamittaisen hyödyntämisen eri toiminnallisuuksien toteuttamiseen verkon eri osissa. Verkkoarkkitehtuurin muutos 6G:ssä johtaa yhä monimutkaisempaan rakenteeseen, jossa datan keräämisen, säilytyksen ja prosessoinnin sijainnit ja määrät voidaan optimoida erilaisten päätelaitteiden, paikallisen reunapilvien, ja keskitettyjen pilviratkaisujen välillä.

Laskentamäärät tulevat kasvamaan merkittävästi. Toisaalta arkkitehtuurin muutos auttaa optimoimaan laskennan sijainnin esimerkiksi viive- ja kapasiteettivaatimusten pohjalta sekä välttämään ylimääräistä datansiirtoa. Älykkyys lisääntyy verkoissa, mikä mahdollistaa ennustavaan toimintaan reagoinnin sijaan. Kyseessä on monimutkainen hajautettu kokonaisuus, jonka kokonaisvaikutuksia ilmastoon ja ympäristöön on vielä tässä vaiheessa vaikea arvioida.

6G-kehitys jakautuu toisaalta sekä erittäin nopeisiin lyhyen kantaman verkkoihin, jotka hyödyntävät uusia erittäin korkeita taajuuksia esimerkiksi terahertsialueella että laajamman peittoalueen ratkaisuihin erityisesti alueilla, joissa nykyiset tiedonsiirtoyhteydet

¹⁴⁷ www.6gflagship.com

¹⁴⁸ 6G lippulaivan visiovideo, <https://www.youtube.com/watch?v=T6ubRoZCeVw>

¹⁴⁹ Latva-aho & Leppänen 2019: Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence. 6G Flagship White Paper. Oulun yliopisto.

ovat puutteellisia. Solukokojen riippuvuus käytettävissä olevista radiotaajuuksista johtaa pienempiin solukokoihin siirryttäessä korkeammille taajuuksille, mikä vaikuttaa verkkojen rakentamiseen ja energiankulutukseen.

6G-tekniikan käyttöönotto edellyttää uudenlaisia sisäverkkoratkaisuja, sillä sisätiloissa riittävään suorituskäyttöön ei näillä näkymin päästä pelkillä ulkotukiasemilla. Uudenlaisten sisätilakuuluvuusratkaisuiden lisäksi sisäverkkojen toteuttaminen edellyttää kuituyhteyden rakentamista rakennuksiin asti. Kuituyhteyksien laajamittainen hyödyntäminen nähdään siten keskeiseksi tulevaisuuden verkkoratkaisuissa, joissa langattomuus on osa verkkoarkkitehtuuria. Sisätilaverkkojen merkityksen kasvu myös muuttaa kuormitusta paikallisemmaksi, mikä puolestaan vaatii optimointia ICT:n kuormittavuuden minimoimiseksi.

Verkkojen paikallisuuden korostuminen on ominaista myös 5G-verkoille, joiden käyttöönoton myötä kansainvälisesti on syntynyt paikallisia 5G-verkkoja täydentämään matkaviestinoperaattoreiden maankattavia verkkoja.

4.4.2. Kestävän kehityksen rooli 6G:ssä

Maailmalla käynnissä olevassa ICT-alan kehityksessä ja myös 6G-tutkimuksessa ovat YK:n vuoteen 2030 tähtäävät sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävän kehityksen tavoitteet nousseet keskeiseen asemaan.¹⁵⁰ 6G:llä nähdään kolmitahoinen rooli: 1) uusien palveluiden mahdollistajana kestävän kehityksen tavoitteisiin vastaamisessa, 2) paikallisena mittaustyökaluna kestävän kehityksen seurantatiedon keräämisessä sekä 3) kestävän kehityksen periaatteisiin nojautuvan ekosysteemin kehittäjänä.

6G-järjestelmien kehitystyön voidaan katsoa tarvitsevan uudenlaiset indikaattorit verrattuna ITU-R:n aiempiin teknisiin IMT-suorituskykymittareihin. Tarvittaisiin indikaattoreita, jotka huomioivat paremmin kestävän kehityksen tavoitteiden edistämisen esimerkiksi pelkän datamäärän siirron vertailun sijaan. Energiatehokkuuden kehittäminen ja todellisen energiankulutustiedon saaminen verkon eri osissa ja päästä päähän eri konfiguraatioilla nousee keskeiseksi vastattaessa kasvavan kuormittavuuden haasteeseen. Tutkimuksen merkitys korostuu. ICT:n hyödyntäminen muilla aloilla vastaamaan kestävän kehityksen tavoitteisiin vaatisi näiden alojen tiiviin mukaan oton jo järjestelmien suunnitteluvaiheessa.

Suomessa on paljon ICT-alan yrityksiä, mutta Suomen ICT-kotimarkkina on pieni. Kestävää kehitystä tukevat vientimarkkinoille tähtäävät ICT-ratkaisut ovat mahdollisuus Suomelle. Esimerkki uusien ratkaisujen kehittämisestä ovat energiaitsenäiset 6G-tukiasemat.

¹⁵⁰ Matinmikko ym. 2020: White Paper on 6G Drivers and the UN SDGs. Draft. <https://www.6gchannel.com/wp-content/uploads/2020/04/6g-white-paper-6g-drivers-un-sdgs.pdf>

4.5. Keinoja verkkojen ilmasto- ja ympäristövaikutusten hallintaan

Verkkojen ilmasto- ja ympäristövaikutuksia voidaan vähentää esimerkiksi verkkoteknologioiden energiatehokkuuteen lisäävillä teknologisilla keinoilla, uusiutuvan sähkön ratkaisuilla kuin erilaisilla rakentamiseen liittyvillä ratkaisuilla.

4.5.1. Mobiiliverkkojen energiatehokkuutta parantavia keinoja

Mobiiliverkkojen käytönaikaista sähkönkulutusta voidaan pienentää seuraavin keinoin:

- Tukiasemasukupolven ikä: modernisoimalla 2G, 3G ja 4G energiankulutus pienenee keskimäärin 46 %.¹⁵¹
- Käytetty radiotekniikka 2G, 3G, 4G ja 5G: uusin radiosukupolvi on tehokkaampi kuin vanha. 5G standardoinnin tavoite on jopa 100-kertainen energiatehokkuus (t/J) 4G:hen verrattuna¹⁵², 4G:n on arvioitu olevan 10 kertaa energiatehokkaampi kuin 3G:n.
- Tukiasemaverkon tiheys: mitä matalampi radiotaajuus on käytössä, sitä vähemmän energiaa tarvitaan per km² (radiopeitto), ja mitä enemmän taajuuksia on käytössä, sitä vähemmän energiaa tarvitaan per Gbps (radiokapasiteetti).¹⁵³ Matalammilla taajuuksalueilla ei kuitenkaan voida tarjota korkeampiin taajuuksalueisiin verrattavia yhteysnopeuksia taajuuskaistojen kapeudesta johtuen. Myös mitä enemmän erilaisia taajuuksia on käytössä, sitä enemmän tukiasemalaitteita tarvitaan, jollei eri taajuuksalueita pystytä tukiasemassa yhdistämään.
- Energiansäästöominaisuuksien aktivointi alhaisen liikenteen aikana: resurssien nukuttaminen säästää keskimäärin 10 %–30 % tukiaseman tarvitsemasta energiasta. Laitekohtaisten energiansäästöominaisuuksien lisäksi voidaan käyttää älykkäitä, verkon liikenneprofiiliin perustuvia algoritmeja.
- Tukiasemalaitetilan jäähdytyslaitteet: ilmajäähdytyslaitteet kuluttavat tyypillisesti 30 %–60 % tukiasematilan kokonaisenergiasta, nestejäähdytyksellä voidaan säästää yli 90 % prosenttia jäähdytysenergiasta. Nesteeseen siirretyn hukkalämmön käyttö laitetilan läheisyydessä pienentää tukiaseman kokonaispäästöjä jopa 80 %.
- Lisäksi tukiasematiloissa on muitakin energiaa kuluttavia laitteita kuten tehonsyöttöjärjestelmät, varallakäyntijärjestelmät, tilojen valaistus ja hälytysjärjestelmät, joita optimoimalla ja modernisoimalla voidaan energiankulutusta pienentää.

Tärkeimmät 5G-verkkojen energiankulutusta pienentävät ominaisuudet:

¹⁵¹ Nokia.

¹⁵² ITU-R M. 2083-0 (2015).

¹⁵³ Nokia.

- 5G Lean Carrier. 4G verkoissa on hyvin tiheä signalointi mikä lisää energiankulutusta. 5G verkoissa signaloinnin määrä on paljon pienempi. Tämä ominaisuus pienentää energiankulutusta keskimäärin 55 % ja parhaimmillaan 80 %.
- Perinteisillä radioilla (2x2 MIMO, 4x4 MIMO) 5G ohjelmisto kuluttaa keskimäärin 55 % vähemmän energiaa kuin 4G-ohjelmistolla.
- 5G Massiivi MIMO eli mMIMO (esimerkiksi 64x64 MIMO) radio kuluttaa keskimäärin kolme kertaa enemmän energiaa verrattuna perinteiseen radioon mutta mMIMO noin viisinkertaistaa radion kapasiteetin mikä mahdollistaa keskimäärin 55 % alhaisemman energiankulutuksen verrattuna perinteiseen MIMO-radioon. mMIMO radioita käytetään tyypillisesti taajuuksien loppuessa, jotta vältetään tukiasemaverkon tihentyminen.
- Uudet korkeat 5G cm ja mm alueen taajuuskaistat ovat monta kertaa leveämpiä kuin vanhat 4G taajuudet, esimerkiksi 100 MHz leveä 5G-taajuuskaista on viisi kertaa leveämpi kuin esimerkiksi 20 MHz LTE-taajuuskaista, mikä mahdollistaa noin 5,5 kertaa enemmän liikennettä samalla radiolla. Uusien taajuuksien tuoma lisäkapasiteetti pienentää tarvetta nykyisen tukiasemaverkon tihentämiselle.
- Harvaan asutuilla alueilla on tärkeää käyttää tehokkaasti alle 1 GHz taajuuskaistoja, joilla mahdollistetaan mahdollisimman laaja peitto mahdollisimman harvalla tukiasemaverkolla. Samalla alhaiset taajuudet mahdollistavat myös tiheästi asutuilla alueilla paremman sisätilakuuluvuuden rakennusten sisällä.

4.5.2. Uusiutuvan energian tuotanto tukiasemapaikoilla

Uusiutuvilla lähteillä (ks. 4.3.2.) tuotetun sähkön hankkimisen lisäksi verkkojen sähkönkäytön hiilisäältöön voidaan pienimuotoisesti vaikuttaa tuottamalla uusiutuvaa energiaa tukiasemapaikoilla. Globaalisti noin 1 prosentissa tukiasemapaikoista on uusiutuvaa energian tuotantoa. Suomessa aurinkovoima ei ole houkutteleva ainoana energianlähteenä kohtuullisen edullisen sähkön hinnan ja erinomaisen sähkönsiirtoverkon laadun takia. Sen sijaan aurinkovoima sopii erinomaisesti tuottamaan osan tukiasemien tarvitsemasta energiasta, kun jätetään pois kallis sähkön varastointi.

Aurinkovoiman kustannusten laskenta on erilaista verrattuna tukiasemakustannuksiin koska aurinkopaneelien elinikä, tyypillisesti yli 30 vuotta, on moninkertainen tukiasemien elinikään. Aurinkopaneelien hinta on laskenut viimeisen kymmenen vuoden aikana yli 90 % ja suurimmalla osalla tukiasemapaikkoja on tilaa ainakin yhdelle aurinkopaneelille. Pienen aurinkovoimalan, joka tuottaa energiaa 11 % ajasta (1000 tuntia vuodessa) saa parhaimmillaan alle 1000 eurolla.

Aurinkovoiman suuremmalle käytölle tukiasemien yhteydessä voisi löytyä perusteita myös sähkön jakeluverkon tasapainottamisessa. Erityisesti haja-asutusalueilla sähköverkon luotettavuus on viime vuosina heikentynyt varsinkin lämpöpumppujen tuottaman loistehon vuoksi, ja tästä voi aiheutua ongelmia varsinkin pienitehoisten led-valaistimien käyttöön. Aurinkosähkön yhteyteen rakennettava vara-akusto voi oikein ohjatuna toimia sähköverkkoa vakaannuttavana tekijänä. VTT tutkii aurinkosähkön käyttämistä 5G-testiverkon energialähteenä Oulussa. Tavoitteena on löytää järjestely, jolla järjestelmästä saadaan mahdollisimman monipuoliset hyödyt sekä 5G-testiverkon että sähkön jakeluverkon tarpeisiin.

4.5.3. Verkkojen yhteiskäyttö ja yhteisrakentaminen

Verkkojen yhteiskäyttö tarkoittaa sitä, että verkkopalveluita tarjoavat teleyritykset hyödyntävät samaa fyysistä verkkoa palvelujensa tarjoamiseen. Yhteiskäyttö ei pienennä tukiasemien käytönaikaista sähkönkulutusta, mutta se vähentää tukiasemapaikkojen kokonaismäärää, koska tällöin ei ole tarvetta rakentaa päällekkäisiä verkkoja. Sitä kautta se vähentää erityisesti passiivisten osien, kuten mastojen ja muiden tukiasemapaikkojen rakentamisen tarvetta ja niiden ympäristövaikutuksia. Esimerkiksi Itä- ja Pohjois-Suomessa DNA ja Telia hyödyntävät verkkojen yhteisyrityksenään toimii Suomen Yhteisverkko.

Eräillä Suomen digitaalisen infrastruktuurin strategiaan¹⁵⁴ sisältyvillä toimenpiteillä voidaan katsoa olevan positiivisia ympäristövaikutuksia. Erityisesti passiivisen infrastruktuurin rakentaminen sähkön maakaapeloinnin yhteydessä sekä verkkojen yhteisrakentaminen vähentävät rakentamiskustannusten lisäksi myös ympäristöhaittoja, kun rakentamiseen liittyvien työvaiheiden ja materiaalien käyttö sekä rakentamisesta syntyvät jätteet ja päästöt vähenevät. Passiivisen infrastruktuurin yhteiskäytöllä voidaan puolestaan tehostaa esimerkiksi yhteisiin laittiloihin liittyvää sähkön käyttöä.

Passiivisella infrastruktuurilla tarkoitetaan kaikkia sellaisia fyysisiä rakenteita, joita voi käyttää viestintäverkkojen rakentamisessa eli esimerkiksi maanalaisia ennakkoputkia, kaapelikaivoja, laittiloja, torneja, mastoja sekä pylviäitä.

Yhteisrakentaminen tarkoittaa puolestaan sitä, että eri verkkojen kuten esimerkiksi sähkö-, tele-, liikenne- ja vesihuoltoverkkojen maa-urakointia vaativat työt suoritetaan yhdessä. Eri verkkojen infra rakennetaan samalla kertaa kaikkien yhteisrakentamisen osapuolten osallistuessa kustannuksiin. Niin sanottu yhteisrakentamislaki (276/2016) tuli voimaan 1.7.2016 ja se sisältää säännökset sekä olemassa olevan verkon yhteiskäytöstä ja uuden infrastruktuurin yhteisrakentamisesta. Laki velvoittaa verkkotoimijoita luovuttamaan toiselle verkkotoimijalle käyttöoikeuden fyysiseen infrastruktuuriinsa sekä suostumaan tämän yhteisrakentamista koskevaan pyyntöön oikeudenmukaisin ja kohtuullisin ehdoin. Käyttöoikeuden luovuttamisesta ja yhteisrakentamisesta voi kieltäytyä vain laissa erikseen määritetyillä perusteilla.

¹⁵⁴ Liikenne- ja viestintäministeriö 2018: Suomi tietoliikenneverkkojen kärkimaaksi – Digitaalisen infrastruktuurin strategia 2025.

4.5.4. Muita keinoja ja verkkojen ympäristönäkökohtia

Kestävää kehitystä tukevassa rakentamisessa myös uudet tietoliikennetarpeet ja niitä tukevat tekniset ratkaisut on syytä huomioida riittävän ajoissa niin kiinteistöjen kuin siihen kiinteästi liittyvän muun infrastruktuurin kannalta. Tämä tarkoittaa eri osapuolten välistä yhteistyötä rakentamisen kaavoituksessa, suunnittelussa ja toteutuksessa.

Kuituverkkoa kannattaa rakentaa sen energiatehokkuuden ja tulevaisuuden kapasiteettitarpeiden kannalta sinne, minne se on taloudellisesti kannattavaa rakentaa. Tai ainakin on hyvä varautua muun passiivisen infrastruktuurin rakentamisessa myös kuituverkon toteuttamiseen myöhemmin siten, että sen rakentamisen ympäristövaikutukset saadaan minimoitua. Mahdollisimman paljon olemassa olevia rakenteita käyttämällä voidaan minimoida rakentamiseen liittyvä materiaalien käyttö. Lisäksi esimerkiksi mikrosahaus on materiaalinkulutusta pienentävä ja ympäristöystävällinen tapa valokuituverkkojen rakentamiseen.

Tiiviin, energiatehokkaan rakentamisen on osaltaan todettu aiheuttavan radiosignaaleille aikaisempaa suurempia vaimennuksia, minkä on arvioitu johtavan kuuluvuusongelmiin rakennusten sisätiloissa. Tähän liittyen liikenne- ja viestintäministeriö julkaisi vuonna 2013 matkaviestinverkon kuuluvuusongelmia matalaenergiarakennuksissa käsittelevän työryhmän raportin.¹⁵⁵ Työryhmän lyhyen aikavälin toimenpidesuosituksia olivat ns. radiosignaalin kuuluvuusarvon määrittely yleisemmille rakennusmateriaaleille, varautuminen matkaviestinkäyttöön sopivan talokohtaisen sisäverkon kaapelointiin sekä kotitukiasemaratkaisujen kehittäminen. Pidemmän aikavälin toimenpiteiksi työryhmä suosittelee laillisten pientoistinten käyttöönoton edistämistä, ratkaisumalleja koskevan tutkimustyön lisäämistä sekä ympäristö- ja viestintäsektorin lainsäädännön valmistelun avoimuuden ja yhteistyön parantamista.

Uusien kiinteistöjen rakentamisessa tai vanhojen saneerauksissa on syytä huomioida, että rakennettavat sisäverkot täyttävät myös tulevaisuuden palvelutarpeet ja ovat siten käyttökelpoisia kymmeniä vuosia. Liikenne ja viestintäviraston määräys M65 on annettu tätä tarkoitusta varten.¹⁵⁶ Sitä sovelletaan vakinaiseen asuinkäyttöön tarkoitetun asuinkiinteistön, toimitilakiinteistön ja julkisen kiinteistön sisäisiin viestintäverkkoihin ja järjestelmiin. Sisäverkkoja, niiden rakentamista, uudistamista ja kunnostamista koskevat ratkaisut ovat kauaskantoisia. Sisäverkkojen elinikä suunnitellaan vähintään 20 vuodeksi, joten on tärkeää, että sisäverkkoja koskevat päätökset, hankinnat ja työt tehdään suunnitelmallisesti myös tulevaisuuden tarpeisiin. Määräyksen lähtökohtana on, että kaikissa asuin-, toimitila- ja julkisissa kiinteistöissä on mahdollista tilata käyttöön nopeita kiinteitä internetyhteyspalveluja eli laajakaistoja (esimerkiksi tämän määräyksen tarkoittama yleiskaapelointijärjestelmä mahdollistaa sisäverkossa ainakin liikennöintinopeuden 1 Gbit/s) ja vastaanottaa tavanomaisia televisiolähettyksiä joko antenni- tai kaapelitelevisioverkosta.

¹⁵⁵ Liikenne- ja viestintäministeriö 2013: Matkaviestinverkon kuuluvuusongelmat matalaenergiarakennuksissa. Työryhmän raportti.

¹⁵⁶ Liikenne- ja viestintävirasto: Määräys 65 D/2019 kiinteistön sisäverkoista ja teleurakoinnista.

Tulevien tietoliikennetarpeiden huomioiminen kiinteistöjen tiloissa tulee myös tärkeäksi, koska tietoliikenteeseen liittyviä laitetoja tarvitaan enenevässä määrin yhä moninaisempien ICT-palveluiden toteuttamiseen niin yrityskäyttäjien kuin kotitalouksienkin kannalta. Tämä voi tarkoittaa kiinteistö- ja taloyhtiöiden sekä yksittäisen omakotitalojenkin kannalta esimerkiksi uuden tyyppisiä laitetoja tai -paikkoja langallisten ja langattomien viestintäverkon tilaajalaitteille.

5. Päätelaitteet

Teollisuuden digitalisaatio ja uudet digitaaliset palvelut mahdollistavat uusia ja myös ilmasto- ja ympäristöystävällisempiä tuotannon, työskentelyn ja vapaa-ajan vieton muotoja. Samalla kuitenkin elektroniikan määrä kasvaa. Ennusteiden mukaan globaali materiaalinkulutus tulee kokonaisuudessaan yli kaksinkertaistumaan vuodesta 2015 vuoteen 2050.¹⁵⁷ Elektroniikkajäte on tällä hetkellä nopeimmin kasvava jätevirta maailmassa: määrä kasvaa jopa 6,5 % joka vuosi.¹⁵⁸

Päätelaitteiden kasvava suorituskky ja uudet ominaisuudet on johtanut vanhojen laitteiden hylkäämiseen kiihtyvällä nopeudella. Melko suuri osa hylättävistä laitteista olisi vielä käyttökelpoisia.¹⁵⁹ 20–35 % elektroniikkajätteestä maailmassa kerätään ja kierrätetään tehokkaasti.^{160,161,162} Tähän osuuteen sisältyvistä arvokkaista maametalleista vain pieni osa saadaan tällä hetkellä taloudellisesti kannattavasti otettua talteen.

Alla tarkastellaan erityisesti kuluttajalaitteiden, pöytätietokoneiden, kannettavien tietokoneiden ja tablettien, älypuhelimien ja -kellojen sekä älytelevisioiden osuutta ICT-palveluiden ketjussa. Verkkolaitteita ja datakeskusten IT-laitteita tarkastellaan lyhyesti luvuissa 3 ja 4. Niihin, kuten teollisuuden eri prosessien laitteisiin ei ole kuitenkaan yksityiskohtaisesti paneuduttu tämän työn puitteissa. IoT-laitteita tarkastellaan luvussa 7, uudet teknologiat.

5.1. Päätelaitteiden kysyntä

Isosta-Britanniasta kerätyn aineiston perusteella yli puolet ostaa uuden älypuhelimien kahden vuoden välein ja viidennes 3–5 vuoden välein. Vajaa kymmenen prosenttia ostaa uuden älypuhelimien vuoden välein. Uusi tabletti ostetaan tätä harvemmin, useimmiten 3–5 vuoden välein ja uusi tietokone tablettia vastaavalla tai pidemmällä vaihtovälillä.¹⁶³ Vaikka uudemmissa malleissa energiatehokkuus olisikin edeltäjiä parempi, on arvioitu, että esimerkiksi älypuhelimia käyttää vähintään 25 vuotta, jotta sen tuotannosta aiheutuneet päästöt korvautuisivat uuden laitteen energiatehokkuudella.¹⁶⁴

¹⁵⁷ Euroopan komissio 2019: European Union Reflection Paper - Towards a Sustainable Europe by 2030.

¹⁵⁸ Sullivan 2018: Printed Electronics: Global Markets to 2022. BCC Research LLC.

¹⁵⁹ IASA 2019: TWI2050 - The World in 2050. The Digital Revolution and Sustainable Development: Opportunities and Challenges.

¹⁶⁰ World Economy Forum 2019: A New Circular Vision for Electronics.

¹⁶¹ Ellen MacArthur Foundation 2017: Circular consumer electronics: an initial exploration.

¹⁶² <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/news-and-events/all-events/international-e-waste-day-2019>

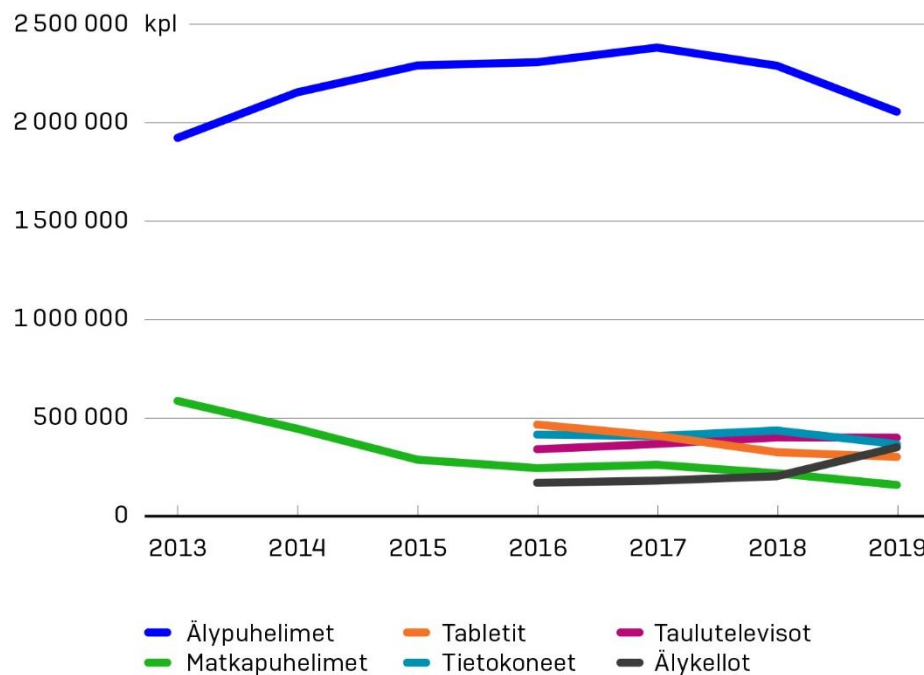
¹⁶³ www.statista.com

¹⁶⁴ European Environmental Bureau 2019: Coolproducts don't cost the Earth. <https://eeb.org/library/coolproducts-report/>

Suomessa myytiin vuosina 2018 ja 2019 yli 2 miljoonaa älypuhelinta kumpanakin vuonna. Kaikesta kodintekniikan myynnistä matkapuhelimet kattoivat 36 prosenttia, arvoltaan 900 MEUR vuonna 2018. Globaalisti luku ylsi noin 1,5 miljardiin kappaleeseen, joista puolet myytiin Kiinassa. Älypuhelimien vuosittaiset myyntimäärät ovat olleet Suomessa laskussa viime vuosina, mikä kertoo markkinoiden korkeasta kylläisyydestä. Sama tilanne on tietokoneiden ja tablettien suhteen.

Tarkempaa 4K-kuvaa tukevien UHD-televisioiden myyntimäärä vuonna 2019 kasvoi Suomessa 14 prosenttia edellisvuodesta. Älykellojen myynti Suomessa oli arvoltaan vain 36 MEUR vuonna 2018, mutta niiden kysyntä oli kasvanut noin 35 % edellisvuodesta. Puettavista laitteista yleisimpiä ovat älykellot ja fitnessrannekkeet. Päätelaitteisiin liitettävien tarvikkeiden, kuten kuulokkeiden, kaiuttimien, ja kuvaustarvikkeiden markkina ylittää 100 MEUR ja kasvaa voimakkaasti.¹⁶⁵

Kuva 14. Matkapuhelimia myydään Suomessa huomattavasti enemmän kuin muita laitteita, mutta UHD-televisioiden ja älykellojen myynti on kasvanut. Lähteet: ETK ry, FiCOM, SYKE.



83 prosentilla suomalaisista on älypuhelin omassa käytössään, alle 45-vuotiaista 98 prosentilla. 87 prosentissa suomalaisista kotitalouksista on tietokone, 54 prosentissa tabletti. Internetiin otetaan yhteys useimmiten älypuhelimella ja sen jälkeen kannettavalla tietokoneella.¹⁶⁶

¹⁶⁵ <https://gotech.fi/2020/02/03/kodintekniikan-kauppa-kasvoi-37-prosenttia-vuonna-2019/>

¹⁶⁶ http://www.stat.fi/til/sutivi/2019/sutivi_2019_2019-11-07_tie_001_fi.html

Suurin osa (99 %) laitteista tuodaan Suomeen ulkomailta.¹⁶⁷ Suomen osuus globaaleista päätelaitemarkkinoista on pieni, alle 1 prosentin kaikissa tarkastelluissa tuoteryhmissä.^{168,169} Toisaalta Euroopan mittakaavassa Suomi tuottaa suhteellisen paljon eräitä laitteisiin tarvittavia harvinaisempia metalleja. Suomessa louhittavien *high-tech* metallien kysyntä saattaa kasvaa jatkossa paljonkin, jos niitä viedään nopeasti kehittyville markkinoille.

5.2. Päätelaitteiden elinkaari

Laitteen elinkaari alkaa tyypillisesti raaka-aineiden louhimisesta ja prosessoinnista sekä tuotteen valmistuksesta. Vaikka tuotesuunnittelu ei suoranaisesti liity materiaali-
virtojen liikkumiseen, nähdään tuotesuunnittelu yleisesti yhtenä elinkaaren vaiheena ennen tuotteen valmistusta. Valmistuksen jälkeen tuote päättyy kuluttajalle, joka käyttää sitä tuotteen käyttöön ajan. Tähän elinkaaren vaiheeseen voi liittyä tuotteen uudelleen-
käyttö (reuse) tai toinen käyttötarkoitus (second life).

Toimivassa kiertotaloudessa teknisen käyttöön jälkeen laite voitaisiin vielä uudelleen-
valmistaa tai sen komponentit hyödyntää suoraan uuden laitteen kokoonpanossa. Käytännössä tämä on toistaiseksi harvinaista. Kun laite on elinkaarensa loppuvaiheessa, eikä sitä tai sen komponentteja voida enää uudelleenkäyttää, saatetaan se yleensä keräyksen ja kierrätyksen piiriin. Näin materiaalit voidaan hyödyntää materiaaleina uudestaan. Osa esimerkiksi palavista materiaaleista, kuten muoveista, voidaan hyödyntää myös energiana. Huonoimmassa vaihtoehdossa laite, tai sen osat, joutuvat loppusijoitukseen, jossa materiaalia eikä sen sisältämää energiaa ei hyödynnetä uudestaan. Kierrätykseen liittyy useita haasteita, joita tarkastellaan luvussa 5.5.

Laitteiden ympäristö- ja ilmastovaikutukset voidaan jakaa seuraavasti:

- Laitteiden materiaalivalintoihin liittyvä raaka-aineiden energia- ja vesi-intensiivinen louhinta ja prosessointi
- Laitteiden elinkaaren aikainen energian kulutus ja siihen liittyvät ilmastovaikutukset
- Hankalasti prosessoitavan jätteen määrän nopea kasvu
- Vaarallisten aineiden hyödyntäminen

Lisäksi eräisiin materiaaleihin liittyy muita vastuullisuusriskejä, kuten huonot työskentelyolot ja lapsityövoima, konfliktit ja korruptio.

¹⁶⁷ Nissinen & Savolainen 2019: Carbon footprint and raw material requirement of public procurement and household consumption in Finland – Results obtained using the ENVIMAT-model. Reports of Finnish Environment Institute.

¹⁶⁸ <https://gotech.fi/category/tilastot/>

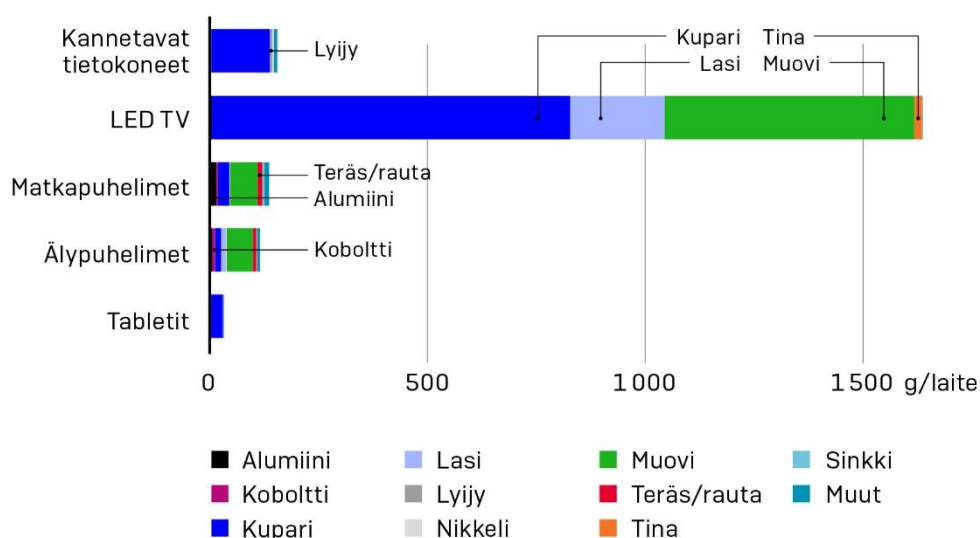
¹⁶⁹ <https://www.statista.com/>

5.3. Päätelaitteisiin liittyvät materiaalivirrat

Päätelaitteisiin liittyvät tärkeimmät raaka-aineet ovat metallit, muovit ja lasi. Metallien louhinta ja prosessointi aiheuttaa suhteessa enemmän ympäristövaikutuksia verrattuna muoviin tai lasiin, etenkin jos kierrätys on sujumatonta. Päätelaitteiden osalta ovat metalleista olennaisia hopea, alumiini, kadmium, kulta, koboltti, kromi, kupari, dysprosium, rauta, gallium, indium, litium, magnesium, neodyymi, nikkeli, palladium, praseodyymi, platina, tina, tantaali, titaani, volframi, iridium, osmium, rhodium, rutenium, lyijy ja sinkki. Akkujen määrän ja koon kasvu vaikuttaa erityisesti litiumin, koboltin, nikkelin ja manganeesin kysyntään. Elektroniikkateollisuus käyttää merkittäviä määriä jalometalleja niiden kemiallisten, korroosio- ja sähkönsäilytysominaisuuksien takia.¹⁷⁰

Nykyiset älylaitteet saattavat koostua yli 60 eri materiaalista, eri määrissä ja eri tavoin toisiinsa yhdistettynä (liimattu, ruuvattu, komposiitteina). Päätelaitteiden toiminnallisuksia kehitetään myös, mikä asettaa uusia vaateita materiaaleille ja niiden soveltuvuudelle eri käyttötarkoituksiin. Päätelaitteilla on hyvin lyhyet innovointiajat, ja voidaan olettaa, että vuoden 2030 älylaite on hyvin erilainen kuin tänä päivänä käyttämämme. Mikroelektroniikan kehitys voi tuoda myös erilaisia materiaalihaasteita eteen.¹⁷¹

Kuva 15. Päätelaitteissa käytetään runsaasti materiaaleja, joista tähän kuvaan sisällytetty vain osa. Lähde: SYKE, Cucchiella ym.



Esimerkiksi matkapuhelimia ja niihin liittyviä materiaalitarkpeita kuvasivat 2000-luvun alussa pienenevät laitekoot, mutta noin vuoden 2008 jälkeen teknologian kehitys siirtyi

¹⁷⁰ Cayumil ym. 2015: Concentration of precious metals during their recovery from electronic waste. Waste Management.

¹⁷¹ Schischke ym. 2019: The Life Cycle of Smart Devices in 2030: The Effect of Technology Trends and Circular Economy Drivers on Future Products.

laitteen kompleksisuuden kasvattamiseen ja matkapuhelimista tehtiin pienoistietokoneita. Materiaalien kannalta tämä tarkoitti aivan uusien yhdisteiden tai metallifunktionaalisuuksien käyttämistä. Viime vuosina kehitystrendi on siirtynyt isompien näyttöjen ja kestävämpien akkujen kehittelyyn.

5.3.1. Kriittiset raaka-aineet

Päätelaitteiden metalleista useat ovat kriittisiä raaka-aineita, joihin liittyy suuri hankintariski ja suuri taloudellinen merkitys ja joiden luotettava ja esteetön saatavuus aiheuttaa huolta Euroopan teollisuudelle ja arvoketjuille.¹⁷² Kriittisten raaka-aineiden riskejä parantaakseen on rajallisia mahdollisuuksia kasvattaa metallien tuotantoa Euroopan sisällä, mutta toki parempia mahdollisuuksia kasvattaa näiden metallien kierrätysasteita. Suomella on kahdessa metallissa tuottajan/toimittajan rooli: sekä koboltti, että germaniumin osalta.

Taulukko 2. Kriittiset raaka-aineet elektroniikassa Euroopan komission mukaan (2017), muokannut SYKE.

Raaka-aine	Tärkeimmät tuottajat maailmassa	Tärkeimmät viejät EU:hun	EU:n toimittajat	Tuonti-riippuvuusaste*	Käytöstäpoiston yhteydessä tapahtuvan kierrätyksen osuus***
Antimoni	Kiina (87 %)	Kiina (90 %)	Kiina (90 %)	100 %	28 %
Koboltti	Kongon demokraattinen tasavalta (64 %)	Venäjä (91 %)	Suomi (66 %)	32 %	0 %
Gallium	Kiina (85 %)	Kiina (53 %)	Kiina (36 %)	34 %	0 %
Germanium	Kiina (67 %) Suomi (11%)	Kiina (60 %)	Kiina (43 %) Suomi (28%)	64 %	2 %
Indium	Kiina (57 %)	Kiina (41 %)	Kiina (28 %)	0 %	0 %
Luonnon-grafiitti	Kiina (69 %)	Kiina (63 %)	Kiina (63 %)	99 %	3 %
Tantaali	Ruanda (31 %)	Nigeria (81 %)	Nigeria (81 %)	100 %	1 %
Platinaryhmän metallit	Etelä-Afrikka (83 %)	Sveitsi (34 %)	Sveitsi (34 %)	99,6 %	14 %
Harvinaiset maametallit	Kiina (95 %)	Kiina (40 %)	Kiina (40 %)	100 %	3-8 %

¹⁷² COM(2017) 490 final.

5.3.2. Haitalliset aineet

Sähkö- ja elektroniikkalaitteet sisältävät myös ympäristölle ja ihmisille haitallisia yhdisteitä. Näitä ovat muun muassa PCB-yhdisteet (polyklooratut bifenyylit), bromipitoiset palonestoaineet ja PVC-yhdisteet (polyvinyylikloridi). Näitä aineita löytyy muun muassa johtimien kuorissa (PVC), elektroniikkalaitteiden suojakuorissa ja koteloissa (bromi) sekä piirilevyissä (PCB).¹⁷³

5.3.3. Suomen primääriraaka-ainevarannot ja niiden hyödyntäminen

Suomessa on muihin EU-maihin verrattuna kohtalaisen hyvä tilanne primääriraaka-ainevarantojen suhteen. Suomessa toimi vuonna 2017 yhdeksän metallimalmikaivosta ja 27 teollisuusmineraalikaivosta. Metallimalmeja louhitaan tällä hetkellä enemmän kuin Suomen kaivoshistoriassa on aiemmin louhittu.¹⁷⁴ Geologian tutkimuskeskuksen arvion mukaan, useiden kriittisten metallien ja mineraalien tuotantopotentiaalit ovat Suomessa hyviä. Litiumin osalta EU:n suurimmat esiintymät ovat Suomessa Ullava-Kruunupyyn alueella.

Elektroniikkaan tarvittavien jalometallien (kultaa, hopeaa, platinaryhmän metalleja) kysyntä on myös kasvanut. Näiden vienti on kasvanut Suomesta viimeisten 15 vuoden aikana euroissa mitattuna 40–900 %. Lisäksi akkumineraalit herättävät tällä hetkellä paljon kiinnostusta. Kiinnostus näkyy varsinkin koboltin ja litiumin malminetsintä- ja jalostus- ja tuotantokemusten määrän kasvuna. Kobolttia käytetään nykyisin erityisesti litiumioniakkuihin, joita on lähes kaikessa pienielektroniikassa. EU:n koboltin toimituksista 66 % Suomesta ja maailman koboltista Suomessa jalostetaan 13 %. Suomalaisten jalostuslaitosten kobolttirikaste tulee Venäjältä, Kongon demokraattisesta tasavallasta, Itävalasta, Etelä-Afrikasta ja Saksasta omien kaivostemme lisäksi. Koboltin tuotanto maailmassa on hyvin riippuvainen Kongon demokraattisesta tasavallasta, ja tuotantoon on liitetty lapsityövoiman käytön kaltaisia eettisiä ongelmia.

5.4. Päätelaitteiden energiankulutus

Modernit laitteet ovat yhä energiatehokkaampia, mutta samaan aikaan pienlaitteiden ja kodinkoneiden määrä kotitalouksissa on kasvanut. Koko ICT-alan energiankulutusta arvioitaessa päätelaitteiden osuus kokonaisuudesta painottuu, varsinkin mikäli otetaan huomioon myös niiden tuotannon aikainen kulutus käytönaikaisen kulutuksen lisäksi.

Käytönaikaista kulutusta voidaan tarkastella huomioiden vain laitteiden käyttöpaikassaan kuluttama sähkö tai huomioiden koko päätelaitteella käytetyn palvelun kulutus eli

¹⁷³ Worrell ym. 2014 Handbook of Recycling: State of the art for practitioners, analysts, and scientists.

¹⁷⁴ Vasara 2018: Toimialaraportit – Kaivosala, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 40/2018.

myös datakeskuksissa ja verkoissa kulutettu energia. Jälkimmäinen tapa on tarkoituksenmukainen, mikäli halutaan esimerkiksi selvittää kuluttajan ICT-päätelaitteen käytön aiheuttama energian kulutus kokonaisuudessaan ja johtaa siitä edelleen hiilijalanjälki (hiilijalanjäljen laskennassa käytetty päästökerroin on erilainen eri maissa ja myös eri palveluissa, riippuen siitä, millaisia reittejä ne käyttävät).

Arvioihin liittyy runsaasti epävarmuuksia, mutta päätelaitteiden energiankulutus saattaa 2020-luvulla laskea hiukan pienempiin ja energiatehokkaimpiin laitteisiin siirtymisen ansiosta.¹⁷⁵ Samalla alan energiankulutus alkaisi painottua enemmän datakeskusten ja verkkojen suuntaan.¹⁷⁶

Päätelaitteiden energiankäyttö on hyvin vaihtelevaa jopa tuoteryhmien sisällä, mutta yksinkertaisten oletusten perusteella voidaan laskea suuntaa antavia tuloksia kokonaiskuvan muodostamiseksi. Päätelaitemäärien ja oletettujen energiankulutusten perusteella saadaan arvioita laiteryhmiä kokonaiskulutuksesta.

Televisiot ovat tarkastelluista päätelaitteista jo muutaman tunnin päiväkäytöllä suurin kotitalouden energian käyttäjä. Televisiot kuuluvat energialuokituksen piiriin ja niiden vuotuinen energian käyttö 4 tunnin päiväkäytöllä löytyy lakisääteisistä merkinnöistä. Suosituimmat tällä hetkellä myytävät televisiot käyttävät tyypillisesti yli 100 kWh vuodessa, suuremmat jo yli 300 kWh. Tässä laskelmassa on mukana vain suora sähkönkäyttö – ei käytön aiheuttama energiankulutus verkossa ja datakeskuksissa, joka aiheutuu esimerkiksi Netflixin käytöstä.

Kodin langattoman verkon reitittimet on tässä yhteydessä hyvä myös huomioida, koska ne ovat yleensä jatkuvasti päällä. Reitittimet tyypillisesti ovat kuitenkin esimerkiksi televisioihin nähden vähäenergisiä. Langattoman tukiaseman energiankulutus on noin 25 kWh vuodessa.¹⁷⁷ Toinen jatkuvasti päällä oleva laite on älypuhelin, mutta sen oma energiankäyttö on erittäin pieni, arvion mukaan alle 10 kWh vuodessa.¹⁷⁸

¹⁷⁵ Andrae 2020: Hypotheses for Primary Energy Use, Electricity Use and CO2 Emissions of Global Computing and Its Shares of the Total Between 2020 and 2030. WSEAS Transactions on Power Systems 15.

¹⁷⁶ Pihkola ym. 2018: Energy consumption of mobile data transfer-Increasing or decreasing? Evaluating the impact of technology development & user behavior. ICT4S.

¹⁷⁷ Sikdar 2013: A Study of the Environmental Impact of Wired and Wireless Local Area Network Access. Consumer Electronics. IEEE Transactions.

¹⁷⁸ Belkhir & Elmelig 2018: Assessing the ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & Recommendations. Journal of Cleaner Production.

5.5. Päätelaitteiden ympäristövaikutusten vähentäminen: erityistarkastelussa materiaalien kierrätys

Eurooppalaisen kuluttajakyselyn mukaan yleisimmät syyt päätelaitteen vaihtamiseen ovat olleet laitteen rikkoutuminen, laitteen suorituskyvyn aleneminen ja tiettyjen sovelusten tai ohjelmistojen käyttötuen päättymisen. Suomalaisista yli puolelle syy päätelaitteen vaihtoon on laitteen rikkoutuminen. 14 prosenttia on vaihtanut päätelaitteensa uusien ominaisuuksien ja palveluiden takia.¹⁷⁹ Joukkoviestinverkoissa laitteiden teknologinen elinkaari on yleisesti ottaen pitkä, jopa 10–15 vuotta, mutta uusimmat palvelut asettavat myös näille vastaanottimille uusia vaatimuksia.¹⁸⁰

Monet olisivat valmiita käyttämään laitteitaan nykykäytäntöjä pidempään: eurooppalaisista 64 prosenttia haluaisi käyttää päätelaitteitaan ainakin 5 vuotta. Laitevalmistajien velvollisuutta tehdä laitteiden korjaamisesta ja osien korvaamisesta helpompaa kannattaa 80 prosenttia eurooppalaisista. Neljännes kannattaa tätä velvollisuutta, vaikka se tarkoittaisi korkeampia hintoja. Suomessa tilanne on vielä selkeämpi: lähes puolet suomalaisista, 46 prosenttia, on valmis maksamaan laitteestaan enemmän, jos sen korjaaminen olisi helpompaa laitevalmistajan toimesta.

Käytöstä poistettujen päätelaitteiden kierrättämisessä eurooppalaiset nostavat suurimmiksi esteiksi kierrätyspisteen etäisyyden omasta elinympäristöstä, huolen tietoturvasuudesta ja sen, että eivät tiedä tarpeeksi laitteen kierrätysprosessista. Suomalaisille suurin huoli on tietoturva: 55 prosenttia suomalaisista on valmis kierrättämään laitteensa, jos voisi olla varma, että se ei tuo mukanaan yksityisyyden suojan riskejä.¹⁸¹

Mahdollisuudet uudelleenkäyttää tai -valmistaa laitteet (kierrättää komponentit) tulisi hyödyntää ennen kuin materiaalit kierrätetään materiaaleina. Ekosuunnittelun tai *Design-for-Recyclability/Circularity*-konseptien on tarkoitus vahvistaa näitä materiaalikierrätyksen edeltäviä vaihtoehtoja.¹⁸² Ympäristön kannalta nämä ovat parempia vaihtoehtoja, sillä niillä vältetään useita resurssi-intensiivisiä prosessoinnin vaiheita. Eri arvoketjujen toimijoiden välisellä vahvemmalla yhteistyöllä voitaisiin huomioida tehokkaampi materiaalien käyttö jo suunnitteluvaiheessa.

Tehokas sähkö- ja elektroniikkaromun (SER) kierrätys pienentää neitseellisten raaka-aineiden kysyntää ja näin ollen vähentää raaka-aineiden tuotantoon liittyviä ilmasto-, vesi- ja muita ympäristövaikutuksia. Kierrätettyjen metallien kasvihuonekaasupäästöt hiilidioksidiekvivalenteina ovat yleensä paljon pienempiä kuin neitseellisistä raaka-aineista tuotettujen metallien, joiden päästöjen odotetaan tulevaisuudessa edelleen kasvavan malmivarantojen köyhtyessä. Samalla kierrätys ylläpitää kierrätysmateriaalien

¹⁷⁹ Euroopan komissio 2020: Attitudes towards the impact of digitalisation on daily lives. Special Eurobarometer 503. Luettu 27.3.2020. <https://ec.europa.eu/commfrontoffice/publicopinion/index.cfm/survey/getsurveydetail/instruments/special/surveyky/2228>

¹⁸⁰ <https://www.testatutlaitteet.fi/ajankohtaista>

¹⁸¹ Euroopan komissio 2020: Attitudes towards the impact of digitalisation on daily lives. Special Eurobarometer 503.

¹⁸² Bartie ym. 2019: The simulation-based analysis of the resource efficiency of the circular economy - the enabling role of metallurgical infrastructure. Mineral Processing and Extractive Metallurgy.

arvon, vähentää riippuvuutta tuontimateriaaleista ja materiaalien niukkuutta yleisesti sekä välttää joihinkin metalleihin liittyviä sosiaalisia ulkoisvaikutuksia. EU pyrkii jatkuvasti lisäämään kierrätysvolyymeja ja kierrätetyn materiaalin osuutta kokonaismateriaalikäytöstä sekä tehostamaan kierrätysprosesseja.

Kierrätettyjen SER-materiaalien volyymeja arvioi Suomessa valtakunnallinen tuottajavastuun valvontaviranomainen eli Pirkanmaan ELY-keskus. Hienojakoista tietoa ei ole saatavilla siitä, mitkä eri kategoriat ovat kuluttajaelektronikassa suurimpia volyymeiltaan.

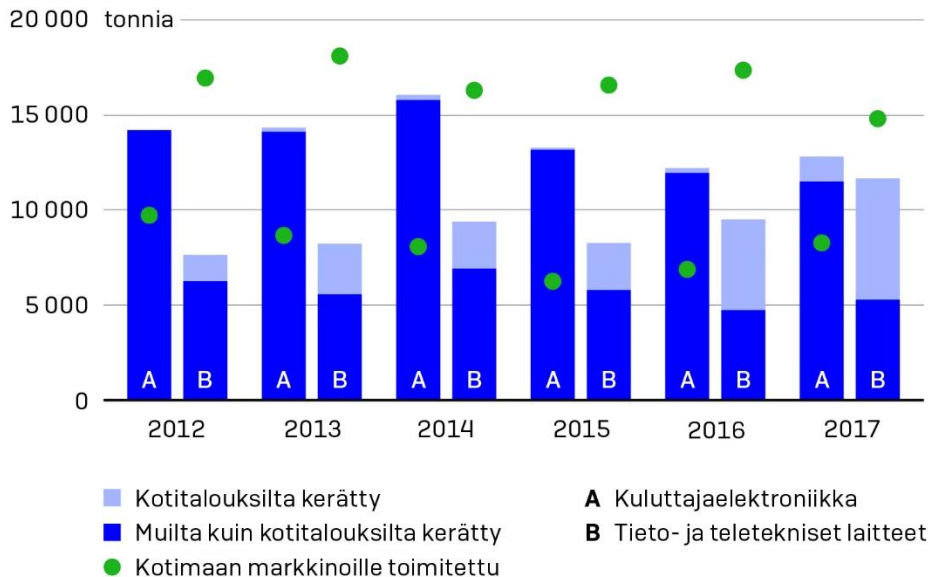
Huomionarvoista on se, että kotitalouksilta (kotitalouksille tarkoitetut kierrätyspisteet) ja muilta kuin kotitalouksilta¹⁸³ kerätyn kuluttajaelektroniikan määrä nousee vuosien 2009 jälkeen yli sen määrän, mitä kotimaan markkinoille on toimitettu. Suurimman osuuden kierrätyksestä muodostaa materiaalien hyödyntäminen, keskimääräisesti vuosien 2008–17 aikana 88 % tuotteista meni materiaalien kierrätykseen, noin 1 % hyödynnettiin energiana ja 10 % vietiin kaatopaikalle. Uudelleenkäytön (joko kokonaisena tai osina) osuus on marginaalinen (<1 %). Suurin osa kierrätysjakeista käsitellään Suomessa ja pienempi osa EU:ssa. EU:n ulkopuolelle ei käytännössä ole viety vuoden 2008 jälkeen kierrätettävää kuluttajaelektroniikkaa.

Kaikki virallisiin keräyspisteisiin tai kauppoihin tuodut laitteet käsitellään ensisijaisesti Suomessa, ainakin lajittelun ensimmäisessä vaiheessa. Tuottajayhteisöt tekevät yhteistyötä yhdeksän kotimaisen käsittelylaitoksen kanssa, samoin joidenkin kierrätyskeskusten sekä tukityöllistettyjen voimin toimivien toimintakeskusten kanssa.¹⁸⁴

¹⁸³ Teleyritysten ja verkkolaitteiden toimittajien kautta kiertävien verkkolaitteiden ja -komponenttien määristä on arvioita luvussa 4.3.3.

¹⁸⁴ <http://www.serkierratys.fi/>

Kuva 16. Sähkö- ja elektroniikkaromun keräystä koordinoi Suomessa Pirkanmaan ELY-keskus. Muilta kuin kuluttajilta kerättyjen laitteiden osuudet ovat kasvussa, erityisesti tieto- ja teleteknisten laitteiden osalta. Niihin kuuluvat älypuhelimet, matkapuhelimet, tabletit, tietokoneet. Kuluttajaelektroniikka sisältää esimerkiksi televisiolaitteet, radiot, kuulokkeet. Lähde: Pir-ELY, SYKE.



5.5.1. Kierrätysasteet

ICT-laitteissa käytettyjen metallien kierrätysasteet ovat matalammat, kuin mitä niiden kestävä käyttö vaatisi. Nykyisenkaltaisella kasvavalla kysynnällä kestävä käyttö on kokonaisuudessaan varsin haastava päämäärä, mutta tehokkaammalla kierrätyksellä voitaisiin ainakin osin ratkaista siihen liittyviä haasteita. Älylaitteet vaativat harvinaisempia ja kriittisiä metalleja ja niiden kysynnän kasvun haasteeseen voidaan pyrkiä vastamaan mahdollistamalla kierrätys erityisesti näiden metallien osalta. Kuitenkin harvinaisten maametallien osalta vain 1 % kierrätetään, ja ylipäänsä noin 35 metallilla on kierrätysasteet, jotka ovat alle 1 %. Tarkkojen kierrätysasteiden määrittäminen on hankalaa, jopa mahdotonta johtuen globaaleista ketjuista, joissa raaka-aineita, rikasteita, puolivalmisteita, tuotteita sekä kierrätysjakeita siirrellään maista ja maanosista toisiin nopealla syklillä.

Kotitalous- ja elektronisten laitteiden kierrätysasteet ovat olleet pieniä verrattuna rakennuksissa, autoissa tai suuremmissa laitteissa käytettyihin metalleihin (85–90 %). Kuitenkin on arvioitu, että juuri näissä pienlaitteissa kierrätysasteet nousevat suhteessa eniten tulevaisuudessa. Kierrätyksen haasteellisuutta nostaa se, että näiden tuotteiden elinkaaret ovat lyhyitä.¹⁸⁵

¹⁸⁵ UNEP, 2013: Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel.

5.5.2. Kierrätyksen tekninen toteutus

Kun ICT-laitteita kierrätetään materiaaleina, jaetaan kierrätysprosessi kolmeen eri päävaiheeseen: 1) lajittelu ja keräys; 2) mekaaniset esikäsittely- ja erottelumenetelmät; 3) metallurginen jatkojalostus, eli arvokkaiden materiaalien talteenotto.

Näiden kolmen vaiheen osalta on ICT-laitteille käytettävissä eri teknisiä kierrätysratkaisuja. Eri ratkaisuilla on erityyppiset tekniset, metallurgiset ja ympäristölliset hyödyt ja haitat. Käytännössä voidaan sanoa, että mitä kompleksisempi ja monimateriaalisempi tuote on, sitä enemmän resursseja kierrätykseen joudutaan käyttämään ja sitä enemmän metalleja prosessin aikana häviää, jollei kyseessä ole kierrätystä varten suunniteltu, modulaarinen tuote. Käytettyjen teknologioiden vaikutus kierrätyksen tehokkuuteen on suuri.

Lajittelu ja keräys

Kuluttajan lajittelu: Kierrätys alkaa, kun kuluttajan erottelee SER:in muista jätteistään. Tämä vaikuttaa koko ketjun tehokkuuteen ja arvometallien talteenottoon. Tehotto-muutta aiheuttaa myös viive sen välillä, kun laite menettää käyttöarvonsa ja se toimitetaan kierrätystoiminnan piiriin.¹⁸⁶ Tämä viive paranee taloudellisten kannustinten myötä. Suomessa kuluttajien tietoisuus kierrätyksestä ja kierrätyspisteistä on hyvällä tasolla, mutta yleisesti ottaen kierrätysvolyymeja voitaisiin kasvattaa, jos kuluttajat toisivat laitteensa paremmin kiertoon.

Keräys: SER:in keräys hoidetaan kunnallisten tai kaupallisten toimijoiden kautta. Globaalisti, SERin keräys on tehotonta, tai virrat ohjataan harmaille markkinoille tai kaatopaikoille.¹⁸⁷ EU:ssa on tuottajavastuu, minkä takia SER-keräys on pakollista.

Mekaaniset esikäsittely- ja erottelumenetelmät

Esikäsittelyn ja erottelun tarkoitus on muodostaa sopivia (hyvälaatuisia) jakeita jatkojalostukseen. Tuotesuunnittelun avulla voidaan kierrätystä helpottaa.^{188,189}

Manuaalinen lajittelu ja purku: Kierrätysoperaattori lajittelee laitteita käsin, aistinvaraisesti arvioiden. Laitteita myös puretaan pienempiin osiin. Käsinsorttua hyödynnetään moderneissakin kierrätyslaitoksissa ja tämä tehostaa jatkojäljittämistä.

Murskaus ja hienonnuks: Lajiteltu ja osin purettu materiaali murskataan ja hienonnetaan, jotta saadaan puhtaampia jakeita. Murskaus käyttää paljon energiaa, joten liian pieneksi murskaaminen ei ole kustannustehokasta. Murskauksen ja hienonnuksen

¹⁸⁶ kuten yllä

¹⁸⁷ kuten yllä

¹⁸⁸ kuten yllä

¹⁸⁹ Reuter ym. 2015: Simulation-based design for resource efficiency of metal production and recycling systems: Cases - copper production and recycling, e-waste (LED lamps) and nickel pig iron. Int J Life Cycle Assess 20.

avulla saadaan harvoin kaikkia kierrätettäviä metalleja eroteltua toisistaan, mikä myös osittain aiheuttaa häviöitä.

Erottelu: Hienonnettu kierrätysmateriaali on täynnä useita kymmeniä arvokkaita tai arvottomia metalleja ja materiaaleja eri muodoissa. Jatkojalostuksen kannalta jakeet tulee erottaa toisistaan, jotta kukin jae saadaan ohjattua oikeaan jatkoprosessiin. Tässä voidaan materiaaleista ja laitoksesta riippuen käyttää erilaisia menetelmiä, kuten magneettia ja painovoimaerotinta.

Pölynpoisto: Koska pölyissä voi olla painoonsa nähden paljonkin arvometalleja, esimerkiksi palladiumia, kultaa, kuparia tai harvinaisia maametalleja, pyritään nämä ottamaan talteen.¹⁹⁰ Pölyt otetaan talteen esimerkiksi sykloneilla, vastavirtaerottimilla tai imureilla.

Seulonta: Seulontaa voidaan käyttää eri vaiheissa, esimerkiksi erottelemassa ylisuuria kappaleita pois tai muuten homogenisoimassa kappalekokoja.

Metallurginen jatkojalostus eli arvokkaiden metallien jatkojalostus

Esikäsitellyn jälkeen syötetään mahdollisimman puhtaat jakeet jatkokäsittelyprosessiin. Puhtaimmat metallijakeet voidaan sulattaa ja myydä eteenpäin. Epäpuhtaat jakeet tulee kuitenkin jatkokäsitellä pyrometallurgisesti (sulattoprosessi), hydro- (liotus) ja elektrometallurgisesti tai biometallurgisesti tai näiden yhdistelmillä.

Käytettävän teknologian valintaan vaikuttaa lähtöaineen laatu. Usein hyödynnetään hydro- ja pyrometallurgian yhdistelmiä; eli ensin erotellaan pyrometallurgisesti suurimmat massat toisistaan, jonka jälkeen hydrometallurgian avulla saadaan metallit prosessoitua vielä hyvin puhtaaseen muotoon.

5.5.3. Eri ICT-laitteiden tai komponenttien kierrätys

<p>CRT-LCD, LED-näytöt ja televisiot</p>	<p>Näyttöjen nopea teknologinen kehitys on esimerkki siitä, miten tuotantoteknologia vaikuttaa kierrätysvolyymeihin. CRT- eli kuva-putkinäyttöjen kierrätys on tunnettua ja kannattavaa, eikä kierrätys aiheuta merkittäviä ympäristövaikutuksia. LCD- ja LED-näyttöjen vakiintuneempi käyttö tuo kuitenkin uusia haasteita näyttöjen kierrätykseen. Esimerkiksi indiumin kierrätys nousee arvoon¹⁹¹. LED-näyttöjen osalta myös gallium, germanium ja muut</p>
--	---

¹⁹⁰ Marra ym. 2015: WEEE Mechanical Treatments: Effectiveness of Critical Materials. Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes.

¹⁹¹ UNEP 2013: Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel.

	<p>harvinaiset metallit¹⁹² sekä näyttöjen piirilevyjen osalta esimerkiksi kulta, kupari ja hopea. Elohopeaa sisältävien putkien käsittely vaatii erikoiskäsittelyn.</p> <p>Lisäksi näytöissä käytetään muoveja, joita voitaisiin kierrättää paremmin, varsinkin jos näiden muovien kierrätys saadaan eristettyä muista muoveista, jolloin voitaisiin estää haitallisten aineiden päätyminen muihin käyttötarkoituksiin¹⁹³.</p>
Kannettavat tietokoneet ja tabletit	<p>Kannettavat tietokoneet ja tabletit ovat olleet arvokkain SER-jätteen kategoria¹⁹⁴ sillä niiden komponenteissa on suhteellisen suuria määriä arvometalleja. Tableteissa suurimmat osuudet arvometalleja painoon suhteutettuna sisältyy LED-näyttöön sekä piirilevyyn kompaktista kokoonpanosta johtuen. Kierrätyksen kannalta hankaluus muodostuu juuri tästä kompaktiudesta. Arvometallien erotteluun tarvitaan spesifejä kierrätysteknologioita. Tehokkaimmin pystytään hyödyntämään nykyaikaisen tietokoneen materiaalit - niistä jopa 99 prosenttia kierrätetään teollisuuden uudelleen käytettäväksi.</p>
Piirilevyt	<p>Piirilevyt sisältyvät moniin ICT-laitteisiin ja ovat massaltaan noin 3–6 % SER-jakeiden kokonaismassasta. Vaikka osuus on suhteellisen pieni, on kuitenkin suurin osa arvometalleista juuri näissä komponenteissa ja verrattuna primäärimalmehin ovat pitoisuudet huomattavasti korkeampia.¹⁹⁵ Kompleksinen materiaalisältönsä ja fyysiset ominaisuudet tuovat haasteensa kierrätykseen. Piirilevyissä on tyypillisesti yli 20 eri metallia, jotka voivat olla bulkkimetalleja (kupari, alumiini, teräs) tai arvometalleja (kulta, hopea, platina) sekä lisäksi haitallisia aineita (antimoni, arseeni, elohopea, lyijy). Näiden kierrätysprosessit ovat tyypillisesti hyvin energiantensiivisiä ja ympäristön kannalta riskialttiita ja niiden avulla voidaan kierrättää vain noin 30–35 % piirilevyn sisältämistä metalleista. Tyypillisesti koko muu materiaali hävitään.</p>
Älypuhelimet	<p>Älypuhelimien kierrätyksessä on haasteita saada vanhat puhelimet kierrätyksen piiriin. Iso osa vanhoista puhelimista jää pöytälaatikkoihin. Jos nämä laitteet saadaan kiertoön, on kierrätysprosessi samankaltainen kuin tablettien kierrätys. Volyymien pienyyden takia eivät kierrätysyritykset ole kovin kiinnostuneita käsittelemään näitä laitteita. Älypuhelimien sisältämät litium-ioniakut ovat potentiaalisempi kierrätyksen kohde.</p> <p>Akkujen kierrätyksessä yksi kiinnostusta herättävä kysymys on koboltin käyttäytyminen, siihen liittyvät mahdolliset riskit kuten ilman päätyminen ja asiaa koskeva säätely.</p>

¹⁹² Buchert ym. 2012: Recycling critical raw materials from waste electronic equipment. Öko-Institut.

¹⁹³ Eskelinen ym. 2016: Muovien kierrätyksen tilanne ja haasteet. Clic Innovation.

¹⁹⁴ Cucchiella ym. 2015: Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

¹⁹⁵ Cayumil ym. 2015: Concentration of precious metals during their recovery from electronic waste. Waste Management.

5.5.4. Kierrätyksen haasteet

Vaikka kierrätys vaikuttaa positiivisesti ICT-sektorin kestävyys, ei kierrätysmateriaalien tuotanto pysty vastaamaan jyrkästi kasvavaan tuotteiden kysyntään. Lisäksi elektronisten laitteiden kierrätystä tarkasteltaessa aliarvioidaan usein materiaalien keskinäiset liitokset tuotteissa.¹⁹⁶

Päätelaitteet koostuvat suurelta osin metalleista, mutta mukana on metallien lisäksi myös muoveja ja lasia. Sen lisäksi, että laitteissa voi tyypillisesti olla 60 % puhtaita metallikomponentteja, sisältyy metallia myös piirilevyihin (jopa 45 eri metallia), LCD ja LED-näyttöihin, kaapeleihin ja metalli-muoviseoksiin. Lisähaasteita koostumuksessa aiheuttaa myös eri osien kiinnitystavat. Esimerkiksi matkapuhelinten kokoonpanossa käytettiin vielä 1990-luvulla laajasti ruuveja puhelimen eri osien kiinnitykseen. Nykyisten älypuhelimien tai -laitteiden osat kiinnitetään enenevässä määrin liimaamalla tai muilla kertaluonteisilla kiinnityksillä. Tämä hankaloittaa sekä korjaamista, että kierrätyksessä esikäsittelyä (purkamista).

Verrattaessa materiaalien paino-osuuksia niiden arvoon, huomataan, että vaikka esimerkiksi puhelimen painosta 45 % voi olla muovia, on silti käytännössä koko arvo metalleissa.

Prosessointi ja talteenotto tulee suunnitella ja optimoida suhteessa materiaalien saantiin, joka vaihtelee kokoonpanoittain tai tuotteittain. Optimointi tapahtuu yleensä taloudellisin perustein, eli kierrätystoimija laskee prosessoinnin kustannukset suhteessa puhtaan metallin arvoon. Puhtaan metallin arvo vaihtelee ajassa rajustikin, joten tämä tekee prosessointiparametrien määrittelystä hankalaa. Prosessin muuttaminen ja optimointi muuttaa väistämättä myös materiaalivirtoja, eli arvokkaiden materiaalien talteenottoa ja käytettyjä apuaineita, sekä suorien tai epäsuorien päästöjen määrää.

Kierrätyksen tarkoitus on palauttaa käytöstä poistettujen tuotteiden materiaalit takaisin käyttökelpoiseen muotoon, eli arvokkaisiin, puhtaisiin raaka-aineisiin, jotka voidaan hyödyntää helposti uusissa elektronisissa laitteissa. Ns. bulkki- tai perusmetallien ja komponenttien tai tuotteiden, jotka sisältävät vain yhtä materiaalia, kierrätys on jo nyt hyvällä tasolla ja resurssitehokasta. Pienet, kompleksiset älylaitteet ovat kuitenkin hankalia kierrätettäviä, sillä ne ovat sekoitus kymmenistä eri metalleista, muoveista, lasista, liimoista. Lisäksi pitoisuudet voivat olla hyvinkin pieniä. Näiden tuotteiden kierrätys vaatii paljon resursseja, jota materiaalit saadaan eroteltua toisistaan.¹⁹⁷

Eri materiaaliyhdistelmät voivat vaatia erityyppisen kierrätysprosessin ja jotkut käytetyt metallit kontaminoivat esimerkiksi teräksen tai alumiinin jalostamattaan muotoon. Jos laitteet saadaan kerättyä kierrätyksen piiriin, on korkeahko kierrätysprosentti saavutet-

¹⁹⁶ Cucchiella ym. 2015: Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

¹⁹⁷ Reuter ym. 2019 Challenges of the Circular Economy: A Material, Metallurgical, and Product Design Perspective. Annual Review of Materials Research.

tavissa jo nykyisillä teknologioilla. On kuitenkin tiedostettava prosessin vaatimat resurssit (esimerkiksi energia tai kemikaalit) suhteessa kierrätettävän metallin arvoon, tai verrattuna primäärimateriaalin tuotannon aiheuttamiin ympäristövaikutuksiin.¹⁹⁸

Ns. kantajametallit (carrier metals) muovaavat kierrätyksen tekniset ja fysikaaliset rajoitukset.^{199,200} Nämä kantajametallit mahdollistavat myös niihin kytkettyjen toisarvoisten metallien (minor metals) kierrätyksen. Nykyisiä elektronisia tuotteita ja niiden sisältämiä eri materiaaleja ei ole suunniteltu eri kantajametallien ja niihin kytkettyjen toisarvoisten metallien jaon mukaisesti. Tämä asettaa haasteita kierrätyksen optimoinnille, sillä useat metallit ovat kierrätysteknisesti (l. metallurgisesti) keskenään ristiriidassa. Lisäksi jotkut tärkeät kantajametallit, ovat regulaation takia poistumassa käytöstä (esimerkiksi lyijy terveysvaikutustensa vuoksi).

Kaikki tuotteet, olivat ne yksinkertaisia tai monimutkaisia, tarvitsevat tietyn määrän primäärimetallien syöttöä parantaakseen metallin laatua, täyttääkseen suuremman kysynnän, tai kompensoidakseen prosessin häviöitä. Häviöt kierrätyksessä voivat olla merkittäviä.²⁰¹ Jokainen kierrätysvaihe, käytännössä jokainen elinkaaren vaihe, aiheuttaa jonkinlaista häviötä joko materiaalissa itsessään tai sen energiassa. 100-prosenttinen kierrätys on fysikaalinen mahdottomuus, sekä materiaalin että energian suhteen ja jokainen kierto käsittää peruuttamattomia häviöitä. Tuotteet voidaan tuottaa 100-prosenttisesti kierrätetyistä materiaaleista, mutta elektroniikkatuotetta ei käytännössä ikinä voida kierrättää 100-prosenttisesti.²⁰²

5.6. Tulevaisuuden yleistyvät päätelaitteet ja uusien materiaalien mahdollisuudet

Uudet elektroniikan materiaalit ovat yksi keino vastata materiaalikäytön haasteisiin.

Uudet materiaalit pohjautuvat ympäristöystävällisiin raaka-aineisiin, joita saadaan uusituvista luonnonvaroista. Tällaisia materiaaleja ovat selluloosapohjaiset materiaalit, kuten paperi, kartonki ja nanosellu, jotka ovat muun muassa VTT:n tutkimushankkeissa^{203,204} todettu sopiviksi elektroniikan alustoiksi. Selluloosapohjaisten materiaalien lisäksi muita kompostoituvia tai biohajoavia materiaaleja ovat biopohjaiset muovit, jotka

¹⁹⁸ Reuter 2018: Inconvenient truths of the circular economy. Rethink/Aurubis.

¹⁹⁹ Reuter ym. 2019 Challenges of the Circular Economy: A Material, Metallurgical, and Product Design Perspective. Annual Review of Materials Research.

²⁰⁰ UNEP 2013: Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel.

²⁰¹ Bartie ym. 2019: The simulation-based analysis of the resource efficiency of the circular economy - the enabling role of metallurgical infrastructure. Mineral Processing and Extractive Metallurgy.

²⁰² Reuter ym. 2019: Challenges of the Circular Economy: A Material, Metallurgical, and Product Design Perspective. Annual Review of Materials Research.

²⁰³ www.ecotronics.fi

²⁰⁴ <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/elektroniikan-kehittajat-aloittavat-mittavan-yhteistyön-tavoitteena-kiertotalous>

hajoavat kompostissa tai luonnossa turvallisesti hiilidioksidiksi ja vedeksi. Biomuovit tarjoavat selluloosapohjaisiin materiaaleihin verrattuna muun muassa paremman kosteuden kestävyys.

Uudet joustavat elektroniikan alustamateriaalit mahdollistavat energia- ja materiaalihokkaiden valmistustekniikoiden hyödyntämisen. Tällä hetkellä monet elektroniikan valmistustekniikat perustuvat materiaalin poistamiseen prosessin aikana. Joustavia materiaaleja, joita saadaan rullamuodossa, voidaan kuitenkin käyttää painatuksessa ja muissa rullalta-rullalle valmistustekniikoissa, joiden periaatteena on lisätä materiaalia vain sinne, missä sitä tarvitaan. Tällöin myös elektroniikan valmistusprosessi pystyy vastaamaan ympäristövaatimuksiin ilman merkittävää materiaalihukkaa.

Siirryttäessä ympäristöystävällisempiin tuotanto- ja tuotemalleihin syntyy samalla uusia liiketoimintamahdollisuuksia olemassa oleville ja uusille yrityksille. Ympäristöystävällisyys voisi olla tulevaisuuden kilpailuvaltti myös elektroniikkateollisuudessa. Paristo- ja akkuteollisuus on yksi merkittävä teollisuudenhaara, joka tulee hyötymään uusista materiaaleista. Nykyään suurin osa akkumateriaaleista saadaan kaivoksista, jotka sijaitsevat pääasiassa Aasiassa, Afrikassa ja Etelä-Amerikassa.²⁰⁵ Kaivostoimintaan ja tuotannon keskittymiseen vain muutamiin maihin liittyy ympäristö- ja eettisiä ongelmia sekä talous- ja toimitusriskejä. Monet akuissa käytettävät materiaalit ovat lisäksi kriittisten raaka-aineiden listalla, kuten katodissa käytetty koboltti ja anodissa käytetty luonnonhiili. Uudet ympäristöystävälliset akkumateriaalit, kuten biohiili²⁰⁶ ja natriumpohjaiset materiaalit, voivat monissa sovelluksissa korvata kriittisiä materiaaleja. Paristot voivat myös perustua täysin uusiutuviin materiaaleihin, joita on kehitetty muun muassa VTT:n iBex-ohjelmassa²⁰⁷, ja niistä voi tehdä jopa kompostoituvia.

²⁰⁵ <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/3rd-mobility-pack/swd20180245.pdf>

²⁰⁶ <https://finnceres.fi/>

²⁰⁷ <https://www.vttresearch.com/en/about-us/why-partner-us/vtt-ibex-runway-innovations>

6. Ohjelmistot

Digitalisaatio on murtanut viimeisen kymmenen vuoden aikana markkinoita ja liiketoimintamalleja. Todennäköisesti merkittävin muutos on ollut loppukäyttäjien käyttäytymisen ja odotusarvojen muuttuminen. Digitalisaation seurauksena loppukäyttäjät odottavat pystyvänsä ratkaisemaan sen hetkiset tarpeensa välittömästi ja reaaliaikaisesti erilaisten ohjelmistojen avulla. Vanhojen ratkaisujen tilalle on syntynyt merkittävä loppukäyttäjille suunnattu markkina. Digitalisaatio on luonut reaaliaikaisuuteen ja automaatioon nojavan markkinan, joka pohjautuu työvoimavaltaisen operaation sijaan teknologiapohjaisiin palveluratkaisuihin.

Teknologiakehitys on ollut digitalisaatiomurroksen ansiosta huomattavaa. Loppukäyttäjakohtaisuuden vuoksi tarve pienille ja riippumattomille sekä älykkäille ratkaisuille on noussut esiin isojen monoliittisten kokonaisuuksien sijaan. Esimerkiksi tekoälyyn, lohko- ketjuihin, esineiden internetin ja tietomassojen hallintaan liittyvä teknologiakehitys on mahdollistanut uusien, usein markkinoita muokkaavien, palveluiden rakentamisen.

Digitalisaation ja teknologiakehityksen nopea edistyminen aiheuttaa vaikeastikin ennakoitavia muutoksia markkinoilla. Palveluntarjoajien on pystyttävä ketterästi muokkaamaan palveluitaan eri toimijoiden tarpeisiin. Tarve olla nopea ja samaan aikaan luoda laatua on muokannut ohjelmistokehitysorganisaatioiden rakenteita ja toimintamalleja. Ohjelmistoja luodaan ja ylläpidetään aiempaa pienemmällä ihmismäärällä ja uusia ohjelmistoversioita otetaan käyttöön jatkuvasti eikä tuotantoon siirto automatisoinnin takia vie aikaa. Tällainen toimintamalli mahdollistaa nopean ja hallitun laadunvarmistuksen ohjelmistokehittäjän puolelta. Lisää tehokkuutta ja nopeutta ohjelmistokehitykseen on luonut yleisten toiminnallisuuksien löytäminen avoimena lähdekoodina.

Ohjelmistoilla on merkittävä rooli nyky-yhteiskunnassa digitalisaation mahdollistajana. Ohjelmistot toimivat kiinteänä osana laitteistoja ja prosesseja. Ohjelmistot tarjoavat keinot datafikaation tuottaman datan käsittelyyn ja samalla tuottavat uutta prosessoitua dataa. Vaikka ohjelmistot sidotaankin aina johonkin toimintaympäristöön ja laitteisiin, myös ohjelmistoilla voidaan tunnistaa elinkaari tuotannosta käytön kautta käytöstä poistoon. Aineettomana tuotteena ohjelmistojen ympäristö- ja ilmastovaikutukset näkyvät kuitenkin lähinnä tuotannossa ja käytössä. Näiden vaikutusten arviointi ja niihin vaikuttaminen ohjelmistotuotannon osalta on vielä lähtöruudussa.

6.1. Ohjelmistojen jalan- ja kädenjälki

IT-ohjelmistojen näkökulmasta (ympäristö)vaikutukset voidaan ymmärtää kahdella eri tavalla: yhtäältä ohjelmiston jalanjälkenä ja toisaalta kädenjälkenä. Ohjelmiston jalanjälki liittyy ohjelmiston välittömiin vaikutuksiin, muun muassa ohjelmiston tuotantoon tarvittaviin resursseihin ja käytönaikaiseen energiakulutukseen, kun taas kädenjälki liittyy ohjelmistojen kautta saavutettaviin (epäsuoriin) hyötyihin. Kädenjälki on jokseenkin vakiintunut tapa kuvata jonkun alan positiivisia ilmastovaikutuksia toisella alalla. Tarkasti ottaen kädenjälki voidaan määrittää vähentämällä saavutetusta hyödystä ratkaisun oma jalanjälki.

Ohjelmistojen vaikutuksia voidaan myös arvioida niiden vihreyden ja kestävyiden kan-
nalta. Vihreydellä tarkoitetaan ohjelmiston koodin tehokasta tuotantoa ja energiateho-
kasta käyttöä, kun taas kestävydellä viitataan joko ohjelmiston kykyyn säilyä pitkään
käytössä (käyttöikä) tai ohjelmiston positiiviseen vaikutukseen suhteessa kestäväen ke-
hityksen tavoitteisiin (sosiaalinen, ekologinen, taloudellinen ja kulttuurinen kestävyys).

Alla ensimmäiseen ominaisuuteen viitataan termillä "pitkäikäisyys" ja toiseen termillä
"kestävyys". Termillä "vihreys" viitataan erityisesti ympäristövaikutuksiin (ekologinen
kestävyys). Pitkäikäisyys usein tuottaa sekä vihreyttä että laajempaa kestävyyttä. Pit-
käikäinen ohjelmisto täytyy esimerkiksi uusia harvemmin ja siten aiheuttaa todennäköi-
sesti vähemmän kuluja, kuin lyhytikäinen ohjelmisto. Toivotuimmassa tapauksessa
kaikki näkökulmat ovat mukana samanaikaisesti: ohjelmisto on suunniteltu tehokkaasti
vihreäksi, minimoiden sen suorittamiseen tarvittavan energian ja tehostaen prosesseja,
sekä kestäväksi, edistään kestäväen kehityksen eri tavoitteita pitkäikäisesti.

Taulukko 3. Ohjelmistokehityksen ympäristöjalanjälki ja kädenjälki.

	Jalanjälki	Kädenjälki
Ohjelmiston tuotanto	<ul style="list-style-type: none"> • Tuotantoon tarvittavat resurssit (laitteet, kehitysympäristöt) • Tuotannon tehokkuus (vihreys) 	*)
Ohjelmiston käyttö	<ul style="list-style-type: none"> • Ohjelmistojen energiankulutus • Ohjelmiston tehokkuus (vihreys) • Ohjelmiston pitkäikäisyys (käyttöikä) 	Ohjelmiston vaikutus kestä- väen kehityksen tavoitteisiin (kestävyys)

*) Lähtökohtaisesti ICT-ratkaisujen tuotanto (ml. ohjelmistot) ei edusta saavutettavia
hyötyjä. Vasta käytön kautta voidaan ulosmitata hyödyt.

Seuraavassa tarkastellaan taulukossa esitettyjä osia tarkemmin kirjallisuudessa esite-
tyn tietämyksen perusteella, aloittaen ohjelmistotuotannosta ja edeten käyttöön ja sen
eri näkökulmiin.

Ohjelmistojen tuotanto, samoin kuin tuotanto yleensä, seuraa erilaisia kulloinkin suosi-
ossa olevia prosesseja. Nykyisellään suosiossa ovat erilaiset ketterät ohjelmankehitys-
menetelmät aiempien vesiputousmallien sijaan. Riippumatta menetelmästä vihreys ja
kestävyys on huomioitava ohjelmistojen kehitystyössä. Vihreys ja kestävyys yhdistettiin
ohjelmistoihin ja ohjelmistoprosesseihin 2010 tienoilla^{208,209,210} lähinnä ajatuksena ym-
märtää, mitä kestävyys tarkoittaa ohjelmistojen näkökulmasta ja erityisesti eri kestäväen

²⁰⁸ Dick ym. 2010: "A model and selected instances of green and sustainable soft-
ware." What Kind of Information Society? Governance, Virtuality, Surveillance, Sustain-
ability, Resilience. Springer.

²⁰⁹ Naumann ym. 2011: The GREENSOFT Model, Sustainable computing: Informatics
and Systems.

²¹⁰ Kern ym. Green Requirements Engineering with the GREENSOFT Model Taking
the whole Lifecycle of Software into Account.

kehityksen näkökulmien ja sidosryhmien vaikutus tähän kestävyys.²¹¹ Hyvin nopeasti näkökulma ohjelmistojen kestävydestä laajeni ajatukseksi siitä, että kestävyys ja vihreys pitäisi nähdä ohjelmiston laatukriteerinä^{212,213} ja siten osana vaatimusmäärittelyä.^{214,215,216,217} Tämän ajatuksen pohjalta on syntynyt sekä yksityiskohtaisia prosesseja, joissa kestävyysvaatimukset pyritään kuljettamaan kehitystyön mukana²¹⁸ että korkean tason julistuksia kuinka kestävyys olisi huomioitava ohjelmistoprosessissa²¹⁹. Vaatimusmäärittelyn lisäksi ohjelmistojen kestävyttä on tarkasteltu ohjelmistoarkkitehtuurin ja ylläpidettävyyden näkökulmasta.²²⁰ Painopiste ohjelmistojen kestävydessä ja vihreydessä on selkeästi kehitystyön alkupäässä, oikeita valintoja tekemällä voidaan ohjelmistojen pitkäikäisyys (käyttöikä/tekninen kestävyys) ja vihreys varmistaa.²²¹

Ohjelmistotuotannon prosessin lisäksi on kiinnitettävä huomiota lopputulokseen eli koodiin. Nykyaikainen ohjelmistokehitysympäristöihin ja ketteriin kehitysmenetelmiin perustuvat lähestymistavat pyrkivät nopeaan koodin julkaisuun, ei niinkään tehokkuuteen koodin ajoon (vihreys). Toisaalta nykyiset kehitysympäristöt eivät myöskään tue energiatehokkaan koodin kehitystyötä²²², jos energiatehokkuutta ei ole huomioitu kehitysympäristössä hyödynnettävissä ohjelmakirjastoissa tai käyttöjärjestelmä ei tue tehokasta suoritusta.²²³ Tämä on taas haasteellista johtuen useista erilaisista koodin suoritussympäristöistä.²²⁴

Ohjelman suoritussympäristö ja konteksti tuovat myös oman haasteensa ohjelmistojen energiatehokkuuden mittaamiseen. Yleiset mittausmenetelmät²²⁵ eivät anna tarkkoja tuloksia, mutta toisaalta yleisen mittausympäristön toteutus ei sekään ole helpoa.^{226,227} Ohjelmistojen energian mittaamista tehdäänkin tyypillisesti hyvin rajatuissa

²¹¹ Lago ym. 2013: Leveraging “Energy Efficiency to Software Users”. GREENS/ICSE.

²¹² Lago ym. 2015: Framing sustainability as a property of software quality. CACM.

²¹³ Condori-Fernandez & Lago 2018: Characterizing the contribution of quality requirements to software sustainability. JSS.

²¹⁴ Becker ym. 2016: Requirements: The key to sustainability. IEEE Software.

²¹⁵ Venters ym. 2017: Characterising Sustainability Requirements. SEIS/ICSE.

²¹⁶ Seyff ym. 2018: Tailoring Requirements Negotiation to Sustainability. RE.

²¹⁷ Seyff ym. 2018: Crowd-Focused Semi-Automated Requirements Engineering for Evolution Towards Sustainability. RE.

²¹⁸ Penzenstadler ym. 2018: Everything is INTERRELATED: Teaching Software Engineering for Sustainability. SEET/ICSE.

²¹⁹ <https://www.sustainabilitydesign.org/>

²²⁰ Venters ym. 2018: Software sustainability: Research and practice from a software architecture viewpoint. JSS.

²²¹ Karita ym. 2019: Software industry awareness on green and sustainable software engineering: a state-of-the-practice survey. SBES.

²²² Capra ym. 2012: Is software “Green”? Information and software technology.

²²³ Ardito & Morisio 2014: Available data and guidelines for reducing energy consumption in IT systems. Sustainable computing: Informatics and Systems.

²²⁴ Jagroep ym. 2016: Extending software architecture views with an energy consumption perspective. Computing.

²²⁵ Taina 2010: How green is your software? ICSB.

²²⁶ Johann ym. 2012: How to Measure Energy-Efficiency of Software: Metrics and Measurement Results. GREENS.

²²⁷ Ahmad ym. 2015: A Review on mobile application energy profiling: Taxonomy, state-of-the-art, and open research issues. JNCA.

konteksteissa²²⁸, jolloin tulokset eivät ole vertailukelpoisia.²²⁹ Oman haasteensa aihepiiriin tuo useiden erilaisten mittareiden käyttö.²³⁰

Tutkimuskirjallisuudessa on esitetty ohjelmistokehityksen kestävyysvarmistamiselle erilaisia keinoja ja mittareita. Erityisen tärkeää ohjelmistokehityksessä on, että näitä mittareita koko ajan seurataan, analysoidaan ja luodaan niiden pohjalta kestävyysliittyviä tavoitteita sovelluksen seuraavaan julkaistavaan versioon. Ohjelmiston ympäristöystävällisyyttä voidaan arvioida esimerkiksi seuraavilla muuttujilla: muokattavuus, uusiokäyttö²³¹, siirrettävyys, kevyt ylläpitotarve, suorituskyky, toimintavarmuus, käytettävyys, ennakoitavuus, tehokkuus ja jalanjäljen seuraaminen. Osa muuttujista tuottaa ympäristösäästöjä kehitysvaiheessa, osa käyttövaiheessa ja osa ylläpidossa.²³² Näiden tavoitteena on ensi sijassa tehdä käytöstä ja huollosta tehokasta, jotta turhaa energiantarvetta voidaan välttää ja toisaalta pidentää sovelluksen ja laitteiden käyttöikää.

Ohjelmistojen energiatehokkuutta parantaviksi keinoiksi on empiirisesti todettu esimerkiksi hakukoneiden kohdalla tehokkaiden hakutoimintojen (query) käyttäminen. Hakukoneiden taustalla olevat tietokannat toteuttavat useimmiten raskaita ja monimutkaisia tiedon järjestämiseen ja indeksointiin liittyviä toimenpiteitä, jotka saattavat tehostaa hakuja, mutta tekevät sen energiatehokkuuden kustannuksella. Toiseksi toimivaksi keinoksi on todettu ohjelmiston tai jonkun sen prosessin tai osan "nukuttaminen" tietyksi ajaksi. "Nukkuva" prosessi ei etene eikä täten kuluta energiaa esimerkiksi öisin tai tietyn toisen prosessin suorittamisen aikana.²³³

Ohjelmistotuotantoprosessin lopputuloksena saadaan johonkin sovellusalueeseen liittyvää ohjelmakoodia, jota ajetaan sille tarkoitetussa suoritussympäristössä (esimerkiksi mobiililaitte, datakeskus). Aiemmin mainitun mukaisesti tämän lopputuotoksen kestävyys voidaan nähdä joko ohjelmistotuotteen pitkäikäisyytenä (longevity, resilience tai reusability) tai epäsuorina kestävä kehityksen periaatteiden mukaisina vaikutuksina sovellusalueella. Ohjelmistotuotteen pitkäikäisyys riippuu yhtäältä tuotantoprosessissa tehdyistä valinnoista ja toisaalta sovellusalueen tarpeista. Nykyiset mobiilisovellukset ovat tyypillisesti lyhytikäisempiä kuin aiemmat työpöytäsovellukset tai keskustietokoneiden ohjelmistot. Ohjelmiston lyhytikäisyys ei välttämättä johdu ohjelmiston tehotto-

²²⁸ Christea 2017: Energy Consumption of Applications on Mobile Phones, M.Sc. Thesis. LUT.

²²⁹ Temesgene 2016: Cyber foraging for green computing, improving performance and prolonging battery life of mobile devices, M.Sc. Thesis. LUT.

²³⁰ Bozzelli ym. 2014: A SLR on green software metrics.

²³¹ Sovelluksien ja niiden osien uusiokäytöstä ks. esim. Radu, 2018: An Ecological View on Software Reuse. Informatica Economică 22:3.

²³² Albertao ym. 2010: Measuring the Sustainability Performance of Software Projects. IEEE 7th International Conference on E-Business Engineering.

²³³ Procaccianti ym. 2016: Empirical evaluation of two best practices for energy-efficient software development. Journal of Systems and Software 117.

masta toteutuksesta vaan kuluttajien muuttuneista tarpeista. Tätä ohjelmistojen suunnitteluun erikoistunutta aluetta on tutkittu runsaasti myös kestävyuden näkökulmasta.^{234,235}

Myös välilliset, epäsuorat vaikutukset sovellusalueella ovat hankalasti mitattavissa, osittain mittauksen monimutkaisuuden ja osittain heijastevaikutusten (rebound) takia. Ohjelmistojen epäsuorat vaikutukset mitataan usein muilla mittareilla kuin energiankulutuksella²³⁶, mikä tekee vaikutusten arvioinnista hankalampaa. Ohjelmiston heijaste-vaikutukset²³⁷ tuovat myös negatiiviset vaikutukset tavallisesti tarkasteltavien positiivisten vaikutusten rinnalle, mikä tekee ohjelmistojen vaikutusten arvioinnista hankalampaa, varsinkaan kun ei puhuta vain energian käyttöön liittyvistä vaikutuksista.

Kestävää ohjelmistotuotantoa on tutkittu ja kehitetty tässä vaiheessa lähes vuosikymmenen ajan, mutta tutkittavaa riittää vielä. Suurimmat esteet kestävien sekä ilmasto- ja ympäristöystävällisten ohjelmistojen tilaamiselle ovat tähän mennessä olleet taloudellisia. Vaikka vihreällä koodaamisella säästetään tilaajan resursseja, voi vihreys tuoda mukanaan erilaisia sertifikaattivaatimuksia, rajoittaa tuotantoketjujen muodostamista tai johtaa kalliimpiin ratkaisuihin. Parhaiten ohjelmoinnin ilmasto- ja ympäristöystävällisyyttä tällä hetkellä edistävät mahdolliset lainsäädännön ympäristövaatimukset, jos tilaajalla ei ole erityistä imagollista tavoitetta vihreydestä.²³⁸ Nopein tapa kohti energiatehokkuutta ohjelmistopalveluissa on energiankulutuksen linkitys palvelun hintaan.²³⁹ Toisena vaikuttavana tekijänä on heikko tietoisuus ohjelmiston kestävyysvaikutuksista. Tietoisuuden lisääminen vaikuttaa käyttäjien sovellusvalintoihin, asiakkaiden esittämiin tarpeisiin ja vaikutuksiin, tuottajien muuttuneisiin kestävyysarvoihin ja sovelluskehittäjien käyttämiin työkaluihin ja laatukriteereihin. Lopulta sopiviin kohtiin vaikuttamalla voidaan muuttaa koko ketjua.²⁴⁰

²³⁴ Blevis 2007: Sustainable Interaction Design: Invention & Disposal, Renewal & Re-use. CHI.

²³⁵ Baumer & Silberman 2011: When the Implication is not to Design (Technology). CHI.

²³⁶ Duboc ym. 2019: Do we really know what we are building? Raising awareness of potential Sustainability Effects of Software Systems in Requirements Engineering. RE.

²³⁷ Coroama & Mattern 2019: Digital Rebound – Why Digitalization Will Not Redeem Us Our Environmental Sins. ICT4S.

²³⁸ Penzenstadler ym. 2014: Infusing Green: Requirements Engineering for Green In and Through Software Systems. TechReport UCI-ISR-14-2.

²³⁹ Hindle 2018: If you bill it, they will pay: Energy consumption in the cloud will be irrelevant until directly billed for. RE4SuSy.

²⁴⁰ Penzenstadler ym. 2018: Software Engineering for Sustainability - Find the Leverage Points! IEEE Software.

6.2. Pilvipalvelut ja SaaS (Software as a Service)

Ohjelmistojen palvelumallit ovat kehittyneet vastaamaan markkinoiden dynaamisia ja muuttuvia tarpeita ja odotuksia. Suurien, monoliittisten ja usein lisenssipohjaisten kokonaisratkaisuiden (serverit + verkot + ohjelmistot) sijaan niin asiakkaat kuin palveluntarjoajat ovat alkaneet siirtyä SaaS-palveluihin. *Software as a Service* -palvelumallit siinänsä eivät rajoita tarjotaanko palvelut asiakkaan omasta datakeskuksesta, palveluntarjoajan omasta pilvestä vai julkisesta pilvestä, vaan mahdollistaa palvelun kapasiteetin käytön halutusta lähteestä.

SaaS-malleissa, joissa palveluntuottaja on kokonaisvastuussa palvelun kustannusrakenteesta, sisältäen käytettävän laskentatehon ohjelmiston ajamiseen, luo kannustimen myös energiatehokkuuteen. On tunnistettava, että monet digitaaliset palvelukokonaisuudet koostuvat useista erillisistä ohjelmistoista ja näissä tapauksissa palvelun kokonaisenergiatehokkuus on vaikeammin hallittavissa, mutta sama kannustin on edelleen olemassa.

Vanhan ohjelmiston vieminen palveluntarjoajan pilveen ei lähtökohtaisesti tarkoita, että ohjelmisto muuttuu energiatehokkaaksi tai ympäristöystävällisemmäksi. Ohjelmiston ajamisen hiilijalanjälki riippuu näissä tapauksissa puhtaasti pilvikapasiteettia tarjoavan palveluntuottajan sähkönhankinnan vihreydestä, sillä ohjelmiston ajamisen energialan jälki pysyy vakiona. Ohjelmistojen ajamisen suhteen on kuitenkin mahdollista jakaa laskentatehoa dynaamisesti, mikä voi tuntuvasti pienentää harvaksen käytettävien ohjelmistojen jalanjälkeä. Toisaalta yhteisten pilviresurssien käyttö voi niitä käyttävän yrityksen puolesta vaikuttaa hyvinkin ympäristöystävälliseltä, poistuuhan omien serverien tarve.

Julkipilvipalvelut ovat viimeisen kymmenen vuoden aikana nostaneet suosiotaan. Suurelle osalle asiakkaista ja palveluntarjoajista kapasiteetin tuottaminen ei ole ollut mielekästä tai liiketoiminnallisesti kannattavaa. Julkipilvipalvelutarjoajat hyötyvät merkittävästi kapasiteetin keskitetystä hallinnasta ja huomattavien volyymitarpeiden vaatimista investointisynergioista.

Maailmanlaajuinen trendi on, että suuri osa, joskin ei kaikki, tarvittavasta pilvipalvelukapasiteetista tullaan tulevaisuudessa tarjoamaan pitkälti muutaman julkipilvipalvelutarjoajan toimesta.²⁴¹ On syytä kuitenkin muistaa, että julkipilvikapasiteetin ja palveluiden käyttäminen ei sellaisenaan ole kustannustehokasta tai energiatehokasta. Tehokkuus saavutetaan vain, jos julkipilvipalveluiden kapasiteettia käytetään dynaamisesti tarpeiden mukaisesti. Tällöin kustannukset ovat suoraan verrannollisia tarpeiden ja palveluiden käytön suhteen. Julkipilveen siirretyn palvelun hiilijalanjälki on myös täysin riippuvainen siitä, missä ohjelmiston laskentateho tuotetaan maantieteellisesti.

Useat yritykset ottavat julkipilvikapasiteettia ja palveluita käyttöön niin sisäisiin kehitystarpeisiin kuin ulkoisiin tuotantotarpeisiin. Pääsääntöisesti tiedon fyysiseen tallennuspaikkaan liittyvät huolet ja sääntely johtavat siihen, että etenkin tuotantotarpeet tulevat jakautumaan niin julkipilviratkaisuihin kuin yksityisiin pilviratkaisuihin. Tärkeää on, että

²⁴¹ TietoEVRY 2020.

tuotekehitys pystyy hallitusti tukemaan samanaikaisesti tuotantoja niin julki- kuin privaattipilvistä. Viimeisen reilun viiden vuoden aikana on esimerkiksi kontitusteknologioiden käyttö ja orkestrointi kasvanut huomattavasti. Näiden teknologioiden tarkoitus (esimerkiksi Docker ja Kubernetes) on poistaa riippuvaisuudet sovelluksien alla oleviin käyttöjärjestelmä- ja infrastruktuuripalveluihin. Todennäköisesti vastaava kehitys tulee edelleen laajentumaan, mikä johtaa pilvipalveluiden kapasiteetin hallinnan tehostumiseen.

Toisaalta esille ovat hiljan nousseet Web 3.0 ja erityisesti P2P-teknologiat. Näissä uusissa toimintamalleissa pyritään tietoisesti pääsemään eroon perinteisten pilvipalveluiden hyödyntämisestä ja sen sijaan tukeudutaan käyttäjien hallussa olevaan talletustilaan ja laskentatehoon. Tällaisten mahdollisten ratkaisujen energiatehokkuutta voidaan tällä hetkellä vain arvailla.

7. Keskeiset nousevat teknologiat ilmasto- ja ympäristönäkökulmasta

Tässä luvussa tarkastellut teknologiat ovat usein huomion kohteena, kun puhutaan digitalisaatiokehityksestä ja palveluiden ja toiminnan perustavanlaatuisesta muutoksesta. Teknologioihin liittyvä tutkimus- ja kehitystyö on lisääntynyt kiihtyvällä vauhdilla viimeisinä vuosikymmeninä ja käytännölliset sovelluskohteet muun muassa teollisuudessa ja kuluttajakäytössä ovat kasvaneet. Poikkeuksen tähän tekee kvanttiteknologia, joka on vielä tutkimus- ja kehitysasteella ja käytännöllisiä sovelluskohteita odotetaan vasta lähitulevaisuudessa.

Tutkimustietoa siitä, miten ICT-alan teknologioiden vaikutukset ilmastonmuutokseen ja ympäristöön kehittyvät tulevien 10–20 vuoden aikana, on vielä hyvin rajallisesti saatavilla. Näin ollen myös sovelluskohteet Suomen kontekstissa sekä näiden tuomat vaikutukset ilmaston- ja ympäristömuutokseen eivät ole tarkasti arvioitavissa. Sovelluskohteet myös vaikuttavat usein epäsuorasti ihmisten käyttäytymiseen ja toimintaan, mikä lisää vaikutusten ennakoimisen epävarmuutta.

Kaikki tavat, joilla teknologiaa yhteiskunnassa sovelletaan, vaikuttavat ilmastoon ja ympäristöön jollain tapaa. ICT-teknologioiden kehitystä eivät lähtökohtaisesti välttämättä ohjaa kestävä kehitys tavoitteet tai ympäristöarvot, vaan esimerkiksi jonkun toiminnan mahdollistaminen tai tehostaminen. Teknologiaa soveltaessa on tärkeä miettiä myös sovelluskohteen lopullista hyödyllisyyttä yhteiskunnan kannalta sekä siitä syntyviä ilmasto- ja ympäristövaikutuksia. Yhteiskunnan kannalta olisi edullisinta priorisoida ICT-teknologioiden käyttö niihin sovelluskohteisiin, joilla on todistetusti mahdollisimman laaja-alaisia positiivisia yhteiskunnallisia vaikutuksia myös ilmaston- ja ympäristön kannalta, huomioiden myös sovelluskohteen käyttäytymisen ja toiminnan muutoksen tuottamat epäsuorat vaikutukset.

Energian ja materiaalien käyttö ovat tarkasteltavien uusien ICT-teknologioiden kannalta suurimmat ilmasto- ja ympäristökysymykset. Vähäpäästöisen sähkön osuuden kasvattaminen verkossa, sekä laitteiden energiatehokkuuden parantaminen ovat suoria tapoja vähentää teknologioiden negatiivisia ilmastovaikutuksia. Teknologian käytön volyymi, sovelluskohteet ja soveltamisen tapa ratkaisevat, luodaanko teknologian avulla lopulta positiivisia vai negatiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia ja missä määrin se tapahtuu. Sovelluskohteet, joilla on positiivinen vaikutus päästöttömän energiantuotannon lisääntymiseen ja kiertotalouteen auttavat osaltaan ratkaisujen löytämisessä.

Tarkasteltavien nousevien teknologioiden taustalla on myös kaksi keskeistä tukiteknologiaa, jotka vaikuttavat paitsi teknologioiden kehitykseen, myös niiden ilmasto- ja ympäristövaikutuksiin. Nämä tukiteknologiat ovat 5G ja pilvipalvelut. Suurin osa uusista sovelluskohteista on riippuvaisia nopeasta ja suorituskykyisestä verkkoyhteydestä. Mobiiliverkoissa tämän kehityksen ilmentymä on tällä hetkellä 5G ja kiinteiden verkkojen puolella valokuitu. Uusille teknologioille on yhteistä kasvava datan määrä. Datan varastointi ja käsittely vaatii enenevässä määrin tallennustilaa ja laskentatehoa, jolloin monesti helpoin, joustavin ja kustannustehokkain ratkaisu on hyödyntää pilvipalveluita. Seuraavissa alaluvuissa on kuvattu työryhmässä keskeisiksi tunnistettujen kuuden

nousevan teknologian ja niiden sovellusalueiden kehittymistä sekä ennustettavia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia. Analyysi mahdollisista vaikutuksista perustuu Liikenne- ja viestintäviraston Traficomin Deloittealta tilaamaan selvitykseen.

7.1. Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen

Tekoäly (artificial intelligence, AI) on tietojenkäsittelytieteen osa-alue, joka painottuu sellaisten koneiden tai ohjelmien luontiin, joiden toimintaa voidaan pitää älykkäänä. Tekoäly mahdollistaa järjestelmät, jotka jäljittelevät ihmismäistä ajattelua ja kykenevät joissakin tapauksissa myös päättelyyn ja oppimiseen. Tekoäly perustuu ennalta määritettyjen tehtävien suorittamiseen tekoälyn ohjelmoidun logiikan perusteella – tällaista tekoälyä kutsutaan kapeaksi tekoälyksi. Yleinen tekoäly viittaa ohjelmistoihin tai koneisiin, jotka osaavat ratkaista minkä tahansa älyllisesti ratkaistavissa olevan ongelman. Yleistä tekoälyä ei ole kuitenkaan toistaiseksi kehitetty, vaan kaikki nykypäivän tekoälyt kuuluvat kapean tekoälyn piiriin.

Algoritmit ovat sääntöjä tai toimintamenetelmiä, joiden perusteella tekoäly toimii. Algoritmi on yksityiskohtainen toimintaohje siitä, miten jokin tehtävä tai prosessi suoritetaan. Algoritmit koostuvat järjestyksessä olevista yksiselitteisistä toiminnoista. Algoritmit ovat usein hyvin monimutkaisia ja pitkiä sekä sisältävät toistoa ja loogista päättelyä. Algoritmien avulla voidaan ohjata tekoäly ratkaisemaan jokin tietty tarkasti määritelty ongelma. Tyypillisiä eri algoritmityyppejä ovat hakualgoritmit, lajittelualgoritmit ja valinta-algoritmit.

Koneoppiminen on yksi tekoälyn keskeisistä osa-alueista. Koneoppimisen tarkoituksena on saada tekoäly toimimaan entistä paremmin käyttäjän toiminnan tai pohjatiedon perusteella. Koneoppimisessa tekoälylle ei tyypillisesti ole määritetty toimintamenetelmää eli algoritmia kaikkiin tilanteisiin, vaan tekoäly oppii itsenäisesti päättämään haluttuun lopputulokseen. Koneoppimisen ero perinteiseen tekoälyyn on, että koneoppimisessä ei pyritä matkimaan ihmisen älykässtä käytöstä, vaan pyritään löytämään isosta data-aineistosta säännönmukaisuudet, joita ihminen ei löytäisi. Koneoppimisen piiriin luetaan myös syväoppiminen, joka on oppimista neuroverkkoihin perustuen, jäljittelemällä karkealla tasolla ihmisaivojen tapaa oppia.

Aihealueen teknologioita hyödynnetään Suomessa jo kohtalaisesti. Sen sovelluskohteita ovat esimerkiksi datan kerääminen päätöksenteon tueksi, henkilöiden tunnistaminen tai ostokäyttäytymisen seuranta. Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen ovat tärkeässä asemassa yhteiskunnan älyllistymisessä, ihmisten ja luonnon käytöksen ennustamisessa, sekä tuotannon ja toiminnan tehostumisessa. Teknologia edistää myös resurssiviisautta ja hajautettua energiantuotantoa.

Ilmasto- ja ympäristövaikutusten näkökulmasta tärkeimmät sovellusalueet ovat älykkäät rakennukset, älykäs sähköverkko, älykäs kiertotalous, ennustaminen ja havainnointi, yksilöiden käyttäytymiseen vaikuttaminen ja älykkäät tuotantojärjestelmät ja prosessit. Suomessa on tunnistettu tekoälyn mahdollisuudet myös julkisten palvelujen kehityksessä. Kansallisessa AuroraAI-tekoälyohjelmassa pyritään luomaan tekoälyn hyö-

dyntämiseen pohjautuvat toimintamallit mahdollistamaan maailman paras julkinen hallinto. Ohjelman tarkoituksena on muun muassa parantaa julkisten palvelujen kohtaan-
toa ja siten vähentää resurssien hukka- ja vajaakäyttöä.²⁴²

Tekoälyä voidaan hyödyntää myös ICT-alan oman energiatehokkuuden parantamisessa, esimerkiksi modernien datakeskusten energiankulutuksen optimoinnissa. Elisa on kehittänyt koneoppimiseen pohjautuvia ratkaisuja mobiiliverkonhallinnan ja -operaation automaatioon. Näillä on arvioitu voitavan säästää jopa 14 % verkkojen energiankulutuksesta.

Tekoälyllä on kuitenkin myös negatiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia aiheuttavia sovelluskohteita. Tekoälyllä ennustetaan olevan merkittävä potentiaali myös fossiilisten polttoaineiden louhinnan tehostamisessa ja edistämässä muun muassa analysoimalla kenttien toimintaa ja paikkaamalla ongelmia ja parantamalla varantojen mallintamista. Digitaalisilla ratkaisuilla teknisesti louhittavissa olevien öljy- ja kaasuväarojen määrää voitaisiin kasvattaa 5 %.²⁴³ Yhteiskunnan päätöksillä nousevien teknologioiden käyttökohteista onkin suuri merkitys sille, millaisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia ja laajempia kestävä kehityksen vaikutuksia niillä epäsuorasti on.

Teknologian ytimessä on datan kerääminen ja käsittely. Jatkuvassa kehityksessä olevat koneoppiminen ja syväoppiminen vaativat erikoislaitteita. Koneoppimisen tai syväoppimisen mallien kehittämiseen ja harjoittamiseen vaadittavat laitteet vievät huomattavia määriä energiaa viikkoja tai kuukausia putkeen. On arvioitu, että pääosa koneoppimisen ja syväoppimisen aiheuttamista päästöistä tapahtuu juuri kehitys-, ohjelmointi- ja opetusvaiheessa.

Yhden kielenoppimisen mallin opettaminen aiheuttaa saman verran hiilidioksidipäästöjä kuin lento Yhdysvaltojen rannikolta toiselle. Huipputeknologiaa olevan kielenoppimisen mallin käyttö, kehitys ja harjoittaminen vastaisi päästöiltään 39 lentomatkaa Yhdysvaltojen yli.²⁴⁴ Toisen tutkimuksen mukaan syväoppivan tekoälymallin opettamisen koko elinkaaren hiilijalanjälki voi olla jopa viisinkertainen verrattuna keskimääräisen amerikkalaisen auton elinkaarenaikaisiin päästöihin.²⁴⁵ Tämä yhteiskunnan älyllistymisen varjopuoli on toistaiseksi jäänyt melko vähälle huomiolle. Tämän lisäksi älykkäiseen mittaamiseen tarvitaan paljon erityyppistä elektroniikkaa ja laitteistoa, joista tulee ennen pitkää elektroniikkaromua.

²⁴² <https://vm.fi/tekoalyohjelma-auroraai>

²⁴³ IEA (International Energy Agency) 2017: Digitalization and Energy. Technology report.

²⁴⁴ Strubell ym. 2019: Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP. The 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL).

²⁴⁵ Strubell ym. 2019: Energy and Policy considerations for deep learning in NLP.

Alla olevassa taulukossa on koostettuna tekoälyn, algoritmien ja koneoppimisen ennakoituja vaikutuksia ilmastoon ja ympäristöön.

Taulukko 4: Tekoälyn, algoritmien ja koneoppimisen mahdolliset vaikutukset ilmastoon ja ympäristöön.

Positiiviset	Negatiiviset
<ul style="list-style-type: none"> Energiankulutuksen optimointi ja uusiutuvien energialähteiden käytön edistäminen (älykkäät rakennukset, sähköverkko) Neitseellisen materiaalin käytön väheneminen ja liitännäisvaikutukset sekä älykäs kiertotalous ja kysynnän ennustaminen Data edistää resurssiviisautta ja materiaali tehokkuutta 	<ul style="list-style-type: none"> Teknisen mittauslaitteiston materiaali vaatimukset ja jatkuva energiankulutus Saattaa hidastaa siirtymää pois fossiilisista polttoaineista edistämällä niiden louhintaa Tekoälymallien opettamisen suuri energiankulutus

7.2. Lohkoketjut ja niiden sovellusalueet

Lohkoketju (blockchain) on teknologia, jonka avulla toisilleen tuntemattomat tahot voivat yhdessä tuottaa ja ylläpitää tietokantoja täysin hajautetusti. Lohkoketju toteutetaan teknisesti listana tai lokina transaktioista, joka jaetaan lohkoketjuun osallistujien kesken, jolloin transaktiot voidaan todentaa monesta lähteestä ja koostaa sen perusteella tietokanta. Lohkoketjussa on siis kyse hajautetusta ja läpinäkyvästä tietokannasta, jota mikään taho ei omista tai kontrolloi yksinään. Hajautuksen ansiosta lohkoketjussa olevaa tietoa on käytännössä mahdoton väärentää. Lohkoketjun yhtenä keskeisenä hyötyinä on, että sen ansiosta transaktioissa päästään eroon erilaisista kolmansista osapuolista puolueettomina varmistajina. Lohkoketjun ansiosta voidaan läpinäkyvästi ylläpitää tietokantoja ilman tietokantoja hallinnoivia tehoja.

Lohkoketjun ensimmäinen merkittävä käytännön sovellus tehtiin vuonna 2009 kryptovaluutta Bitcoinia varten. Lohkoketjuteknologia on kuitenkin vielä varsin uutta ja sen sovellusalueet ovat vasta laajentumassa. Teknologiaa hyödynnetään tällä hetkellä muun muassa finanssisektorilla, digitaalisen asunto-osakekaupan palveluissa ja logistiikkatoimialalla tavarankuljetuksen seurannassa. Suomessa on perustettu muutamia suurempia lohkoketjuverkostoja tunnistamaan ja kehittämään lohkoketjuihin perustuvia ratkaisuja eri toimijoiden kesken. Lohkoketjujen yleistyminen Suomessa edellyttää osin sekä rakenteellisia muutoksia yhteiskunnan toimintaan ja luottamuksen rakentamiseen, että laajempien avointen lohkoketjujen vaatiman suuren energiankulutuksen ongelman ratkaisemista. Ilmasto- ja ympäristövaikutusten näkökulmasta lohkoketjujen tärkeimmät sovellusalueet ovat muun muassa vertaiskaupankäynti, läpinäkyvyyden ja luotettavuuden tarjoamat ratkaisut esimerkiksi logistiikassa sekä rahtialueiden ratkaisut.

Lohkoketjuteknologia mahdollistaa yksilöiden välisen vertaiskaupan läpinäkyvästi ja luotettavasti ilman välikäsiä. Teknologialla voikin olla merkittävä rooli hajautetussa energiantuotantomallissa. Uusiutuvan energian vertaiskaupankäynnin myötä kotitaloudet ja taloyhtiöt voisivat myydä itse tuottamansa ylijäämäenergiaa lohkoketjualustan avulla suoraan muille kuluttajille. Tämä voisi lisätä kotitalouksien ja taloyhtiöiden kannustinta rakentaa uusiutuvia energiantuotantoratkaisuja.

Lohkoketjuteknologialla voidaan merkittävästi edistää läpinäkyvyyttä ja luotettavuutta toimitusketjuissa ja yritysten omassa toiminnassa. Kestävän kaivostoiminnan edistämisen seurannan ja sertifiointin avulla on yksi mahdollinen sovelluskohde, joka voisi osaltaan vaikuttaa koko teknologia-alan vastuullisuuteen. Kaivoksissa louhituille raaka-aineille voidaan luoda digitaaliset sormenjäljet, jolloin raaka-aineita voidaan lohkoketjun avulla luotettavasti seurata koko sen toimitusketjun läpi.

Lohkoketjuteknologiaa voidaan käyttää myös uusiutuvan energian sertifikaattien aitouden varmentamiseen. Lohkoketjuteknologian avulla toteutettu uusiutuvien energian sertifikaattien aitouden varmentaminen lisää ostajien luottamusta ja poistaa tarpeen kolmansien osapuolten tekemälle sertifiointille. Myös yritysten vastuullisuusraportointiin ja -datan varmentaminen helpottuisi ja tarkentuisi lohkoketjuteknologian käytön myötä.

Lohkoketjuilla voitaisiin saada myös suoraviivaistettua rahoitusprosesseja ja esimerkiksi yritysten kohdalla tämä voisi johtaa kestävien innovaatioiden nopeampaan kehittämiseen ja käyttöönottoon. Myös lohkoketjuihin pohjautuvat kryptovaluutat ovat ilmentyneet perinteisten valuuttojen rinnalle, mutta niiden käyttö on vielä hyvin vähäistä.

Kryptovaluuttoihin liittyy niiden niin sanottu louhinta. Louhinnan tekninen tarkoitus on taata kryptovaluutan transaktioiden pysyvyys ja luoda pysyvä tallenne niiden keskinäisestä järjestyksestä. Ehtoja säätämällä voidaan säätää lohkon löytämiseen tarvittavan laskennan määrää: tätä kutsutaan myös vaikeustasoksi. Lohkoketju säätää lohkoilta vaadittavaa vaikeustasoa aina määritellyin välein – toisin sanoen louhinnan vaikeusaste muuttuu louhijoiden yhteenlaskettujen laskentatehojen määrän mukaan. Tämän vuoksi louhinta vaatii hyvin paljon laskentatehoa, minkä vuoksi onkin perustettu suuria määriä tietokoneita sisältäviä louhintafarmeja. Louhinta on suosittua, sillä louhimalla käyttäjät voivat ansaita virtuaalivaluutaa palkkiona louhimisesta.

Lohkoketjuteknologian selkeänä negatiivisena puolena on siihen liittyvän laskennan vaatima suuri energiankulutus. Tämä on erityisesti haasteena julkisissa globaaleissa lohkoketjuissa kuten Bitcoin. Tällaisissa laajamittaisissa julkisissa lohkoketjuissa energiankulutus on tämänhetkisessä kehitysvaiheessa niin suurta, että ilmaston ja ympäristön kannalta positiivisimmatkin sovelluskohteet voivat jäädä kokonaisvaikutuksiltaan negatiivisiksi. Lohkoketjuteknologiaa voidaan soveltaa julkisten globaalien lohkoketjujen lisäksi käyttämällä yksityisiä lupaan perustuvia lohkoketjualustoja. Näillä alustoilla vain tietyillä oikeuden saaneilla validointisolmuilla on lupa lisätä tai muuttaa lohkoketjun lohkoja. Lupaan perustuvat lohkoketjualustat voivat olla huomattavasti julkisia alustoja

energiatehokkaampia, ja voivat osaltaan ratkaista lohkoketjuille tyypillistä energiankulutusongelmaa.²⁴⁶

Taulukko 5: Lohkoketjuteknologian mahdolliset vaikutukset ilmastoon ja ympäristöön.

Positiiviset	Negatiiviset
<ul style="list-style-type: none"> Uusiutuvien energialähteiden käytön lisääntyminen ja vertaiskaupankäynti Kestävä ja vastuullinen tuotanto ja raportointi sekä arvoketjujen läpinäkyvyys ja luotettavuus Suoraviivaisempi rahoitus voi johtaa kestävien innovaatioiden nopeamman kehittämiseen ja käyttöönottoon 	<ul style="list-style-type: none"> Lohkoketjuteknologian energiantarve voi nykyisellä kehitysasteella tehdä useista sovelluskohteista ilmastoon kannalta negatiivisia Suoraviivaisempi rahoitus voi johtaa myös ilmastoon- ja ympäristömuutoksen kannalta haitallisten innovaatioiden nopeampaan kehittämiseen ja käyttöönottoon

7.3. Robottiikka ja autonomiset järjestelmät

Robottiikka on oppiala robottien suunnittelemisesta, rakentamisesta ja käytöstä. Robotit voivat suorittaa perinteisesti ihmisten suorittamia tehtäviä täysin tai osin autonomisesti ilman ihmisen vuorovaikutusta edes laitteiden tai koneiden välityksellä. Autonomisella järjestelmällä viitataan vastaavalla tavalla toimiviin järjestelmiin ja ohjelmistoihin. Näiden teknologioiden keskeisiä sovelluskohteista ovat esimerkiksi teollisuusrobotit, yhteistyörobotit, ohjelmistorobotit, liikenteen ja logistiikan sovellukset ja kuluttajakäyttöön suunnatut robotit.

Näistä sovelluskohteista erityisesti teollisuusrobotit ovat jo pitkään olleet käytössä eri teollisuuden aloilla. Teollisuusrobottien uudempi ilmentymä on yhteistyörobotti, joka toimii yhdessä ihmisen kanssa teollisessa tuotannossa. Siinä missä teollisuusrobotit ovat yleensä hyvin suurikokoisia ja kankeita, ovat yhteistyörobotit suunniteltu herkemiksi ja pienikokoisemmiksi. Tuotantoteollisuuden lisäksi robottiikkaa on käytössä monissa muissakin organisaatioissa ohjelmistorobottiikan muodossa. Ohjelmistorobottiikan avulla on automatisoitu tietotyön rutiiniprosesseja, jotka ovat aiemmin olleet ihmisen suorittamia. Tietojärjestelmiä käyttävät ohjelmistorobotit perustuvat joko ennalta määriteltyyn työnsuorituksen tai tekoälypohjaiseen itseoppivaan ohjelmistoon.

Robottiikkaa ja autonomisia järjestelmiä hyödynnetään Suomessa jo laajamittaisesti etenkin teollisuudessa. Tuotantojärjestelmien hintojen tasaantuessa odotetaan hyödyntämisen vielä lisääntyvän, koska teknologia tehostaa tuotantoprosesseja ja vähentää

²⁴⁶ Andoni ym. 2019: Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities.

hukkatuotantoa. Teknologia kehitty vauhdilla, mikä avaa yhä uusia ja monimutkaisempia sovelluskohteita. Uuden sukupolven robotit hyödyntävät toiminnassaan tekoälyä, algoritmia ja koneoppimista, mikä mahdollistaa myös ihmisen korvaamisen joissakin operaatioissa. On kuitenkin huomioitava, että jokainen robotti ja järjestelmä tarvitsee energiaa toimiakseen ja laitteet uusia materiaaleja.

Ilmasto- ja ympäristövaikutusten näkökulmasta robotiikan ja autonomisten järjestelmien tärkeimmät sovellusalat ovat liikenne ja logistiikka, jossa robotiikan sekä automaattisten ja autonomisten järjestelmien arvioidaan olevan tulevaisuuden liikennejärjestelmän keskiössä. Älykästä liikennettä, liikenteen automaatiota ja sen kehittymistä kuvataan tarkemmin alaluvussa 8.1.2 ja logistiikan ratkaisuja luvussa 9.1. Lisäksi robotiikan ja autonomisten järjestelmien odotetaan tuovan positiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia automaattisten tuotantojärjestelmien ja -prosessien, tehostuneen havainnoinnin, arvioinnin ja korjauksen sekä hiilen talteenoton ja varastoinnin saralla.

Liikenteessä ja logistiikassa esimerkiksi miehittämättömien ja automatisoitujen droonien hyödyntäminen tavarankuljetukseen voisi mahdollisesti vähentää tavaraliikennettä etenkin kaupunkialueilla.²⁴⁷ Droonien käyttö tavaraliikenteessä on vielä kokeiluvaiheessa. Merkittävänä haasteena ovat kuljetusten koko- ja painorajoitukset, näköyhteyden ulkopuolelle tapahtuvan lennättämisen vaatimien laaja-alueisten viestintäyhteyksien käyttö sekä lennonohjausjärjestelmän kehittäminen.

Tutkimusten mukaan robotiikan ja autonomisten järjestelmien positiiviset ilmastovaikutukset liikenteessä ja logistiikassa, kuten tavaraliikenteen päästöjen väheneminen, ovat rajallisia ja riippuvaisia kontekstista²⁴⁸ sekä siitä, miten muut ilmasto- ja ympäristötoimet, kuten sähköistyminen ja jakamistalous, etenevät. Lisäksi liikennemäärät voivatkin odottamattomasti kasvaa ja vaikkapa logistiikan hajauttaminen johtaa lisääntyvään materiaali- ja energiantarpeeseen.²⁴⁹

Logistiikkarobotiikkaa voidaan hyödyntää myös yritysten sisälogistiikan välineenä. Teknologialla voidaan korvata perinteistä ihmistyötä, kuten tavarankäsittelyä, vastaanottoa ja lajittelua varasto ympäristöissä.²⁵⁰ Robotiikkaa voidaan hyödyntää myös erilaisten työkonoiden automatisoinnissa esimerkiksi maataloudessa, mutta myös muilla aloilla. Näissä robotiikan hyödyntämisen tilanteissa on mahdollista säästää vaikkapa valaistuksen ja ilmastoinnin aiheuttamissa kuluissa ja päästöissä. Jälleen vaikutukset riippuvat sovelluskohteesta: Mikäli autonominen järjestelmä tehostaa vaikkapa hiilen louhintaa, ovat vaikutukset ympäristön kannalta negatiivisia.

²⁴⁷ IEA (International Energy Agency), 2017: Digitalization and Energy. Technology report.

²⁴⁸ Goodchild & Toy 2017: Delivery by drone: An evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO2 emissions in the delivery service industry. Transportation Research.

²⁴⁹ Stolaroff ym. 2018: Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery.

²⁵⁰ GeSI (Global e-sustainability initiative) & Deloitte 2019: Digital with Purpose - Delivering a SMARTer 2030.

Robotteja, esimerkiksi kehittyneitä drooneja, voidaan hyödyntää myös havainnointiin, arviointiin ja korjaukseen. Niiden avulla on mahdollista tehdä havaintoja ja suorittaa toimenpiteitä paikoissa, jotka ovat ihmiselle vaikeasti saavutettavia.²⁵¹ Esimerkiksi sähköverkon tarkistamista voidaan tehdä droonin avulla ja myös huolto suorittaa ilman matkustamista. Erityisillä laitteilla varustettujen droonien avulla voidaan myös saada täysin uudenlaista kuvaa luonnosta ja sen tilasta. Robotiikkaa voidaan hyödyntää myös vedenalaisessa ympäristön arvioinnissa ja -valvonnassa. Teknologiat tuovat siis uusia välineitä ilmasto- ja ympäristötutkimukseen ja niiden seurantaan.

Maailmalla on myös kehitteillä useita tekniikoita ja laitteita, joilla voitaisiin jatkossa ottaa talteen ja varastoida hiiltä suoraan ilmakehästä, vaikkapa puita matkivien robottien avulla.

Taulukko 6: Robotiikan ja automaattisten järjestelmien mahdolliset vaikutukset ilmastoon ja ympäristöön.

Positiiviset	Negatiiviset
<ul style="list-style-type: none"> Rahtiliikenteen ja sisälogistiikan automaatio ja optimointi tekevät kuljetuksesta kustannustehokkaampaa ja vähäpäästöisempää Etähuolto ja -monitorointi pidentää laitteiden elinkaarta Ympäristövaikutusten mittaaminen robottien avulla auttaa arvioimaan luonnon tilaa ja tuottaa materiaalia ympäristöasioiden tutkimukseen ja kuluttajaviestintään Hiilen sitominen pois ilmakehästä 	<ul style="list-style-type: none"> Robottien ja autonomisten järjestelmien energiankulutus sekä materiaali-tarve Liikenteen mahdollinen lisääntyminen automaation myötä, johtaa kasvavaan energiankulutukseen Varastotilojen hajauttaminen droonikuljetusten vuoksi lisää materiaali-vaatimuksia ja tilojen energiankäyttöä Esimerkiksi hiilen louhinnan tehostuminen ja edistäminen saattaa hidastaa siirtymää pois fossiilisista polttoaineista

7.4. Kvanttitekнологia

Kvanttitekнологia tarkoittaa kvanttimekaniikan ilmiöiden kuten superposition ja lomittumisen hallittua hyödyntämistä käytännöllisissä laitteissa, prosesseissa ja laskennassa. Kvanttitekнологia mahdollistaa esimerkiksi kvanttietokoneiden ja kvanttilaskennan kehittämisen.

Kvanttietokone on vasta kehitteillä oleva tietokone, mutta siitä odotetaan ratkaisijaa erityisesti laskennallisiin tehtäviin, joissa klassisella tietokoneella kuluisi huomattavan

²⁵¹ IEA (International Energy Agency) 2017: Digitalization and Energy. Technology report.

pitkiä ajanjaksoja. Laskennallisilla tehtävillä tarkoitetaan tässä yhteydessä tehtäviä, joissa on yksinkertainen vastaus, mutta läpikäytävänä valtava määrä mahdollisuuksia. Kvanttitietokoneen klassista tietokonetta suurempi teho perustuu siihen, että sen muisti voi olla yhtä aikaa kaikissa mahdollisissa tavallisten bittien yhdistelmissä. Klassista tietokonetta kvanttitietokone ei kokonaan korvaa, sillä ne eivät sovellu kaikkeen laskentaan yhtä hyvin, mutta esimerkiksi optimointiin ja simulointiin liittyvässä laskennassa kvanttitietokoneella voi tulevaisuudessa olla suuri rooli.

Kesken olevan kehitystyön lisäksi kvanttitekniologiaa hyödyntävien tietokoneiden yleistymisessä ja käytössä on muitakin hidasteita. Käytännössä kvanttitietokoneen käyttäminen ja hallitseminen on hyvin vaativaa, sillä käyttötilan lämpö ja laitteen sisäiset vuorovaikutukset vaikuttavat helposti laskentaan, minkä vuoksi kvanttitietokonetta esimerkiksi käytetään tyypillisesti lähellä absoluuttista nollapistettä. Rakentaminen on myös toistaiseksi hyvin kallista. Näiden haasteiden vuoksi arviot kvanttitietokoneiden saamisesta laajempaan käyttöön vaihtelevat. Joidenkin arvioiden mukaan kvanttitietokoneita voisi olla jo muutamien vuosien päästä ja toisten arvioiden mukaan vasta muutaman vuosikymmenen kuluttua. Kehittämisessä on kuitenkin viime vuosinakin otettu merkittäviä harppauksia ja tehty innovaatioita, jotka edistävät alan kehittämistä.

Kvanttitekniologialla nähdään olevan lähinnä positiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia, koska se tekee ongelmanratkaisusta nopeampaa ja energiatehokkaampaa. Kvanttitietokoneiden rakentamisen tai ylläpidon ympäristövaikutukset eivät esimerkiksi eroa olennaisesti samankaltaisista laitteistoista, joten siitä ei koidu merkittävästi aiempaa suurempia päästöjä. Teknologiasta voisi esimerkiksi olla ratkaisuksi ICT-alan energiankulutukseen. Kvanttitekniologian sovelluskohteiksi tulisi kuitenkin valita vain sellaiset, joissa normaali tietokone ei pääse ratkaisuun samalla teholla.

Tarkemmin määriteltynä ilmasto- ja ympäristövaikutusten näkökulmasta tärkeimmät kvanttitekniologian sovellusalat ovat muun muassa tekoälyn, algoritmien ja koneoppimisen tehostaminen suurteholaskennalla, mikä parantaisi teollisuuden ja liikenteen suunnittelu, vaikutusmallien laskenta ja ennakoimista. Lisäksi kvanttitekniologia mahdollistaa läpimurtoja hiili-intensiivisissä prosesseissa.

Kvanttitekniologian tarjoama kasvava laskentateho mahdollistaa tekoälyn ja algoritmien tehostamisen ja täten kehittyneiden päästö- ja ilmastovaikutusmallien laskennan ja tarkan ennustamisen muun muassa liikenteen volyymeistä, eri liikkumismuotojen tarpeesta ja matkaketjujen matka-ajoista. Tämän avulla voidaan välttää kaupunkiliikenteen ruuhkautumista, lyhentää odotusaikoja ja tehostaa liikenteen sujuvuutta. Myös ennustemallien tarkkuus kasvaa voimakkaasti tehostuneen laskentakapasiteetin myötä ja kapasiteettia voidaan hyödyntää erilaisten prosessien päästö- ja vaikutusmallien laskentaan.

Kvanttitekniologia mahdollistaa huomattavan tehokkaan molekyylihallintamisen, mikä johtaa nykyisen näkemyksen mukaan useisiin läpimurtoihin hiili-intensiivisten prosessien kehityksessä jo seuraavan 10 vuoden aikana. Tämän ansiosta voidaan tuottaa il-

maston kannalta nykyistä puhtaammin esimerkiksi ammoniakkia ja vetyä. Vihreän vedyn valmistusprosessin halpeneminen voi mahdollistaa muun muassa vähähiilisen vedyn käyttämisen energianlähteenä teollisuudessa.²⁵²

Myös tehokkaammat katalysaattorit vähentävät hiilen sitomiskustannuksia mahdollistaen uusia sovelluksia teolliseen hiilen talteenottoon ja varastointiin. Tällä pystyttäisiin suoraan vähentämään hiilidioksidipäästöjä esimerkiksi energiantuotannossa.

Kvanttilaskennan potentiaalia vaativan laskennan energiatehokkaassa suorittamisessa perinteisten supertietokoneiden sijaan käsitellään myös luvussa 3.5.2.

Taulukko 7: Kvanttitekniikan järjestelmien mahdolliset vaikutukset ilmastoon ja ympäristöön.

Positiiviset	Negatiiviset
<ul style="list-style-type: none"> Energiankulutus saattaa olla vähäinen verrattuna supertietokoneisiin Hiili-intensiivisten tuotantoprosessien korvaaminen vihreillä ratkaisuilla Hiilivoimaloiden hiilidioksidipäästöjen väheneminen hiilen sidonnan avulla Liikenteen hiilidioksidipäästöjen väheneminen liikenteen kokonaisvaltaisen mallintamisen kautta 	<ul style="list-style-type: none"> Kvanttitietokoneiden rakentaminen ja ylläpito materiaaleineen Jäähdytykseen menevä kulutus Saattaa hidastaa siirtymää pois hiilivoimaloista

7.5. Lisätty ja virtuaalinen todellisuus sekä median sovellusalueet

Lisätty todellisuus (augmented reality, AR) viittaa näkymään, jossa tietokoneella tuotettua tietoa (esimerkiksi kuva, ääni, video, teksti, GPS-informaatio) on lisätty näkymään todellisen ympäristön yhteydessä. Lisätyn todellisuuden näytötekniikat voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: päässä pidettävä, kädessä pidettävä tai puettava ja heijastettava (projisoitava). Päässä pidettävä näytötekniikka jaetaan vielä kahteen tyyppiin: Optisissa näytöissä käyttäjä näkee todellisuuden läpinäkyvän pinnan läpi ja virtuaalinen informaatio liitetään tähän pintaan. Videonäytöissä todellisuus kuvataan päässä pidettävän kameran läpi ja tämä informaatio liitetään virtuaaliseen informaatioon ennen sen esittämistä käyttäjälle näytön kautta. Kädessä pidettävä näyttö voi olla esimerkiksi

²⁵² Boston Consulting Group, 2020. A Quantum Advantage in Fighting Climate Change.

älypuhelin, jolloin laitteen näytöllä esitetään sen kameran kautta kuvattu ympäristö täydennettynä lisätyn todellisuuden informaatiolla. Kädessä pidettävään laitteeseen voidaan rinnastaa myös muut päälle puettavat näytölliset laitteet kuten rannelaitteet, joissa on riittävän suuri näyttö. Projektionäytöt voivat olla esimerkiksi kannettavia videoprojektoreja, joilla voidaan heijastaa informaatiota mille tahansa pinnalle.

Lisätyssä todellisuudessa tietokone analysoi eri sensoreista saatavan datan kuten GPS-paikkatietodatan, kameran visuaalisen datan sekä kompassin ja kiihtyvyysantureiden datan ja käyttää sitä reaalian näkymän ja virtuaalisten elementtien mahdollisimman täsmälliseen yhdistämiseen. Käyttäjä voi usein myös olla vuorovaikutuksessa lisätyn todellisuuden elementtien kanssa esimerkiksi kosketusnäyttöä koskettamalla.

Virtuaalitodellisuus (virtual reality, VR) on tietokonesimulaation tuottamien aistimusten avulla luotu keinotekoinen ympäristö. Virtuaalitodellisuus joko pyrkii simuloimaan todellista ympäristöä tai luomaan täysin kuvitteellisen ympäristön. Tyypillisesti virtuaalitodellisuuden ympäristöt perustuvat kolmiulotteiseen kuvatilaan, joka luodaan näytölle. Kuvatilaa voidaan pyrkiä tuottamaan katselijalle immersiiivisesti eli siten, että hän kokee olevansa kuvatilalla sisällä. Tällöin näyttönä käytetään tyypillisesti erityistä stereoskoopista katselulaitetta eli virtuaalitodellisuuslaseja tai niin sanottua cave-tilaa, jossa käytetään kolmea tai useampaa projisointipintaa, joiden välissä katselija voi liikkua ja jopa liikuttaa kuvassa olevia objekteja. Joissakin simulointiympäristöissä käytetään lisäksi muita aistiärsykeitä, kuten simuloitua kolmiulotteista äänimaailmaa tai tuntoaistiin perustuvia liikeärsykeitä.

Virtuaalitodellisuudella voidaan myös viitata virtuaalimaailmoin, jotka ovat kaksi- tai kolmiulotteisella grafiikalla luotuja tietokonesimulaatioita. Käyttäjä voi luoda itseään edustavan simuloidun ja usein ihmisenkaltaisen hahmon (avatar), jonka avulla hän voi tutkia virtuaalimaailmaa. Monen käyttäjän virtuaalimaailmoissa käyttäjät ovat aktiivisessa vuorovaikutuksessa toistensa kanssa ja muovaavat toistensa kokemaa virtuaalitodellisuutta.

Virtuaalitodellisuudeksi voidaan lukea myös sovellukset, joissa käyttäjä voi katsella simuloituja panoraamakuvia ja ohjata niitä horisontaalisesti 360 asteen kiertomahdollisuudella sekä (rajoitetusti) vertikaalisesti. Samoin virtuaalitodellisuutena voidaan pitää myös virtuaalisia koulutusympäristöjä ja simulaattoreita, joissa simuloidaan tarkasti esimerkiksi liikennevälineiden tai koneiden toimintaa.

Lisätty ja virtuaalinen todellisuus liittyvät laajempaan tehostetun (sekoitetun) todellisuuden (mixed reality) käsitteeseen, joka voidaan nähdä liukuvana jatkumona kevyesti lisätystä todellisuudesta kohti täydellisempää immersiota virtuaalitodellisuuteen.

Lisätyn ja virtuaalisen todellisuuden kehitys ja sovelluskohteiden lukumäärä on kasvanut voimakkaasti viime vuosikymmenien aikana. Näiden teknologioiden merkittävimmät sovelluskohteet liittyvät viestintään, suunnittelutyöhön, koulutukseen ja viihteeseen.

Lisättyyn ja virtuaaliseen todellisuuteen liittyvillä teknologioilla on ominaista, että samaa elektroniikkaa käytetään yleensä useaan eri sovelluskohteeseen ja siten niillä voi olla erisuuntaisia vaikutuksia. Esimerkiksi etäoppimisella voidaan saavuttaa positiivisia ilmastovaikutuksia, mutta virtuaalitodellisuuselektroniikkalaitteistolla voidaan myös

käyttää mittavissa määrin muita palveluja, joiden käyttö vaatii korkean laskentatehon ja paljon energiaa.

Lisätyn ja virtuaalisen todellisuuden sovellusten käyttö painottuu yksityisiin kuluttajiin ja organisaatioihin. Aihealueen ilmasto- ja ympäristövaikutuksille onkin olennaista, tu-leeko esimerkiksi virtuaalitodellisuusteknologiasta jokaisen kotitalouden peruskodin-elektroniikkaa, eli miten suureksi teknologiaan liittyvän elektroniikan määrä kasvaa. Mi-käli elektroniikka leviää laajasti kaikkiin kotitalouksiin, tulisi sen sovelluskohteilla olla merkittäviä positiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia, jotta teknologian nettovaikutuk-set jäisivät selvästi positiivisiksi.

Virtuaalista ja lisättyä todellisuutta voidaan hyödyntää ilmasto- ja ympäristöviestin-nässä. Vakuuttava virtuaalinen teknologia on uusi ala, jonka tarkoituksena on kehittää ihmisten asenteita ja käyttäytymistä muokkaavia ohjelmia. Virtuaalitodellisuus mahdol-listaa entistä vaikuttavamman tiedottamisen ilmastomuutoksen vaikutuksista, mahdol-listamalla simulaation esimerkiksi merenpinnan noususta rannikkoalueen asukkaille.²⁵³ Lisätyn todellisuuden keinoin kuluttajalle voitaisiin myös tarjota tietoa ympäristövaiku-tuksista ostopäätösten tueksi. Lisättyä todellisuutta voidaan hyödyntää näyttämällä ku-luttajille ilmaston- ja ympäristömuutokseen liittyvää tietoa reaaliaikaisesti eri tuotteista ja palveluista ostopäätöstä tehdessä. Näin voidaan sekä lisätä ympäristötietoisuutta että helpottaa ilmastoystävällisten ostopäätösten tekemistä.

Lisätty ja virtuaalinen todellisuus voi vaikuttaa merkittävästi suunnittelutyöhön kaikilla yhteiskunnan osa-alueilla. Teollisuuden tuotantoprosessien virtualisointi on jo jossain määrin käytössä oleva sovelluskohde.²⁵⁴ Tämä tarkoittaa käytännössä teollisuuden tuotannossa olevien tuotteiden testausta, visualisointia ja tuotekehitystä simuloidussa ympäristössä niiden täydessä mittakaavassa. Sovelluskohteen avulla suunnittelutyö voidaan toteuttaa globaalisti ja virtuaalisesti eri sidosryhmien kesken, mikä vähentää tuotekehitykseen perinteisesti kuuluvan matkustamisen tarvetta ja tätä kautta tuoteke-hityksen päästöjä. Simuloiduilla prototyypeillä voidaan lisäksi kokonaan korvata fyysi-set prototyypit, mikä vähentää materiaalien käyttöä prototyyppien koosta riippuen mer-kittävästikin.²⁵⁵

Digitaalista todellisuutta käytetään enenevissä määrin myös kaupunkien suunnittelun, muotoilun ja kehittämisen työkaluna.²⁵⁶ Tällä on selkeä positiivinen vaikutus maankäyt-töön, sillä tarkempi ymmärrys muutosten vaikutuksesta jo suunnitteluvaiheessa johtaa parempiin ja kestävämpiin ratkaisuihin rakennusten ja rakenteiden sijoittelussa muu-hun ympäristöön soveltuvasti. Virtuaalista todellisuutta voidaan hyödyntää myös ope-tuksen ja koulutuksen tarpeisiin (ks. myös luku 8.1.5.). Etätyön ja -asiainnin tavoin tämä vähentää ennen kaikkea matkustamisesta aiheutuvia negatiivisia ilmasto- ja ym-päristövaikutuksia.

Virtuaalimatkatilaisuudet mahdollistavat matkustamista vastaavan kokemuksen tarjoamisen vir-tuaalisesti eri puolille maailmaa. Virtuaalimatkatilaisuuden avulla voi myös syventää todellista

²⁵³ GeSI (Global e-sustainability initiative) & Deloitte 2019: Digital with Purpose - Deliv-ering a SMARTer 2030.

²⁵⁴ kuten yllä

²⁵⁵ kuten yllä

²⁵⁶ kuten yllä

vierailu- ja matkailukokemusta eri paikoissa, kuten siirtymistä historiallisista maisemista aina simuloituun tulevaisuuteen asti. Monet kaupungit kuten Helsinki ovat kertoneet pyrkivänsä toteuttamaan virtuaalimatkailejoille perinteiseen matkailuun kannustavan matkailukokemuksen. Jos tämä ei vähennä matkailua, sen ilmastovaikutus jää negatiiviseksi, koska suurien virtuaalimaailmojen rakentaminen vaatii paljon laskentatehoa. Mikäli virtuaalitodellisuusteknologia kehittyisi hyperrealistiseksi ja virtuaalimaailmojen rakentamisessa voitaisiin hyödyntää kvanttietokoneen laskentakapasiteettia, voi kuitenkin olla mahdollista, että virtuaalimatkaileu saattaisi aidosti korvata turismia ja sen ilmastovaikutuksia pidemmällä aikajänteellä.

Taulukko 8: Lisätyn ja virtuaalisen todellisuuden järjestelmien mahdolliset vaikutukset ilmastoon ja ympäristöön.

Positiiviset	Negatiiviset
<ul style="list-style-type: none"> • Ilmasto- ja ympäristötietoisuuden ja kulutustottumusten muuttaminen • Materiaalien käytön väheneminen ja liitännäisvaikutukset • Matkustamisen tarpeen vähentyminen vähentää hiilidioksidipäästöjä 	<ul style="list-style-type: none"> • Virtuaalitodellisuuslaitteiston käyttö kuluttaa paljon energiaa • Elektroniikan materiaali-vaatimukset

7.6. IoT-sovellukset

Esineiden internet (Internet of Things, IoT) käsittää fyysisten laitteiden ja objektien yhdistämisen internetiin. Automaatioon ja digitalisaatioon liittyvät langattoman tiedonsiirron teknologiat ovat kehittyneet voimakkaasti 2000-luvun aikana. Erityisesti langattoman tiedonsiirron teknologioiden edistyminen on edesauttanut esineiden internetin kehittymistä. Mobiiliverkkojen ja WiFi-verkkojen ohella laitteiden väliseen kommunikaatioon on kehitetty myös useita kevyempiä teknologioita. IoT-aikakauden voidaan sanoa alkaneen vuosikymmenen vaihteen Bluetooth ja RFID -tyyppisten teknologioiden myötä. Nämä aikaiset teknologiat ratkaisivat lyhyen kantaman laitteiden välisen tiedonsiirron, mutta pidemmillä yhteysväleillä tukeuduttiin muihin tiedonsiirtoratkaisuihin. Langattomien IoT-ratkaisujen tarpeisiin on 2010-luvulla kehitetty laajempien verkkojen toteuttamisen mahdollistavia teknologioita kuten NB-IoT, LoraWAN ja Sigfox. Tällaiset pitkän kantaman ja pienen tehonkulutuksen teknologiat ovat mahdollistaneet entistä edullisemmat ja yksinkertaisemmat päätelaitteet, joilla yhä monipuolisempia reaali-aailman asioita voidaan seurata, digitalisoida ja automatisoida.

Akku-, sensori- ja radioteknologian kehittyessä sekä käytettyjen komponenttien hintojen laskiessa yhä useampia laitteita tullaan kytkemään langattomalla verkkoyhteydellä toisiinsa, erilaisiin taustajärjestelmiin sekä internetiin. IoT-sovellusten avulla pystytään tehokkaasti keräämään tietoa ja ymmärtämään paremmin jotakin reaali-aailman prosessia tai ilmiötä sekä reagoimaan siihen tarvittavalla tavalla. Näin IoT-ratkaisuja hyödyntämällä ja automatisoimalla voidaan helpottaa, nopeuttaa ja parantaa prosesseja ja erilaisia työsuoritteita. Monesti IoT-ratkaisun avulla automatisoitu sovellus tuottaa myös

positiivisia ympäristövaikutuksia muun muassa vähentyneenä energiankulutuksena. Sensoreiden ja älykkäiden laitteiden toimintaympäristöstään, laitteesta itsestään sekä sen käytöstä keräämä data nähdään myös yhä arvokkaampana resurssina. Laitteiden liittäminen toisiinsa, datan kerääminen ja analytiikka sekä mahdollinen etäohjattavuus verkkoyhteyden avulla mahdollistavat uudenlaisten älykkäiden ja automatisoitujen järjestelmien ja digitaalisten kokonaisuuksien kehittämisen.

Suomalaiset teleyritykset toimittavat IoT- ja M2M -liittymiä esimerkiksi sähkö- ja vesiverkon mittareihin, mutta pystyvät myös rakentamiaan verkkoja, erilaisia IoT-päätelaitteita ja pilvipalveluja hyödyntämällä luomaan kokonaisratkaisuja, joilla eri käyttöalueilla voidaan ratkaista erilaisten prosessien energiakulutukseen ja resurssitehokkuuteen liittyviä haasteita. IoT:n kokonaisratkaisut tuovat positiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia muun muassa tehostamalla tai vähentämällä liikkumista ja ajoneuvojen käyttöä, jolloin fossiilisten polttoaineiden aiheuttama ilmaston kuormitus vähenee.

Yksi tyypillinen IoT-sovellus on asioiden paikantaminen, joka vähentää esimerkiksi laitteiden tai materiaalien etsimistä. Ajoneuvon ajoreitti voidaan optimoida etukäteen, kun asioiden sijainti on reittiä suunnittelevan sovelluksen tiedossa. Toisaalta IoT-päätelaitteet voivat kerätä tietoa prosesseista tai ilmiöistä, joita aikaisemmin on havainnoinut manuaalisesti. Näin esimerkiksi säännölliset sadevesikaivojen pinnankorkeudet tai ulkoilualueen tulipaikkojen polttopuiden määrät voidaan tarkastaa IoT-pohjaisella tiedonkeruulla ja vähentää näin tarvetta liikkua erilaisilla ajoneuvoilla. Myös materiaalien ja komponenttien reaaliaikaisia saatavuustietoja voidaan parantaa IoT-ratkaisujen avulla. Näin voidaan välttää suunnittelemattomia tuotantokatkoksia ja parantaa reagoitokykyä ongelmien ilmetessä. Ennustettavuus parantaa prosessien tehokkuutta ja sujuvuutta.

Tällä hetkellä IoT-laitteiden määrän lasketaan olevan hieman laskentatavasta riippuen 10 miljardin molemmiin puolin. Verkkoon kytkeytyneiden IoT-laitteiden määrän ennustetaan kasvavan noin 15 %:n vuotuisella kasvuvauhdilla noin 25 miljardiin laitteeseen vuoteen 2025 mennessä.²⁵⁷ Nykyiset IoT-käyttötapa-ukset vaihtelevat esimerkiksi yksinkertaisesta vesimittarin tietojen luennasta reaaliaikaiseen kamerakuvan siirtämiseen sekä videokuvan koneelliseen analysoimiseen. Suomessa kotitalouksien yleisin verkkoon kytketty laite keväällä 2019 oli televisio (47 %) ja toiseksi yleisin oli pelikonsoli tai urheilulaite (24 %).²⁵⁸ IoT-käytössä olevia koneliittymien SIM-kortteja (Machine-to-Machine, M2M) oli Suomessa kesäkuun 2019 lopussa 1,6 miljoonaa kappaletta, joka on kuusi prosenttia enemmän kuin vuotta aiemmin.²⁵⁹ Tulevaisuudessa automaattisten järjestelmien sekä dataan ja analytiikkaan pohjautuvien sovellusten määrä tulee entisestään lisääntymään.

IoT-sovellukset luovat mahdollisuuksia kokonaan uusille tuotteille (esim. älyrannekkeet) ja toisaalta lisäävät tietoverkkoja hyödyntäviä ominaisuuksia perinteisiin laitteisiin kuten televisioihin. Tämä lisää kuluttajaelektronikan kysyntää ja määrää. Verkkoyhteyden tukeutuvien laitteiden ohjelmisto saattaa vanheta paljon sen fyysisistä osaa nope-

²⁵⁷ <https://www.ericsson.com/4acd7e/assets/local/mobility-report/documents/2019/emr-november-2019.pdf>

²⁵⁸ Liikenne- ja viestintävirasto 2019: Viestintäpalvelujen kuluttajatutkimus. Julkaistu 29.5.2019. <https://www.traficom.fi/fi/viestintäpalvelujen-kuluttajatutkimus>

²⁵⁹ Liikenne- ja viestintävirasto 2019: Viestintäpalveluiden tilastotaulukko. Päivitetty 3.3.2020. <https://www.traficom.fi/fi/tilastot-ja-julkaisut/tilastot>

ammin ja näin lyhentää tuotteiden elinkaarta ja lisätä elektroniikkajätteen määrää huomattavasti. Vaikka esimerkiksi IoT-tuotteen mekaaniset osat olisivat uutta vastaavassa kunnossa, tietoturva tai taustalla olevat verkko-toiminnallisuudet ovat voineet vanhentua ja estää tuotteen käyttämisen kokonaan tai ainakin tietoturvallisesti.

IoT-sovellukset mahdollistavat toiminnan optimoinnin useissa käyttökohteissa, joita on esitelty luvussa 8. Toisaalta sovellukset lisäävät myös elektroniikan määrää, jonka elinkaareen liittyviä kysymyksiä on käsitelty luvussa 5.

Taulukko 9: Esineiden internetin sovellusten mahdolliset vaikutukset ilmastoon ja ympäristöön.

Positiiviset	Negatiiviset
<ul style="list-style-type: none"> • Monet IoT-ratkaisut mahdollistavat muun toiminnan optimoinnin lukuisissa merkittävässä käyttökohteissa ja kuluttavat itsessään vähän virtaa 	<ul style="list-style-type: none"> • Erityisesti kuluttajakäytössä IoT-ratkaisut saattavat lisätä laitteiden määrää ja lyhentää niiden elinkaarta synnyttäen elektroniikkajätettä

8. ICT ilmasto- ja ympäristöhyötyjen tuottajana

Tieto- ja viestintäteknologia on erottamaton osa nyky-yhteiskuntaa ja sen avulla tuotetaan palveluita niin elinkeinoelämälle, julkishallinnolle kuin yksityisille ihmisille. Noin 70 % maailman väestöstä käyttää ICT:tä, ja onkin esitetty, että alan aiheuttamat päästöt tulisi suhteuttaa siihen, kuinka moni ihminen ICT:n tuottamia ratkaisuja hyödyntää. Alan per capita -päästöt ovat alhaiset verrattuna moneen muuhun alaan, kuten lentoliikenteeseen tai autoiluun.²⁶⁰

Erityisen kiinnostavia tämän raportin näkökulmasta ovat ne hyödyt, joita ICT voi tuottaa ilmastonmuutoksen etenemisen ja ympäristön tilan heikkenemisen vastaisessa työssä. Perinteisesti bruttokansantuotteen kasvu on lisännyt hiilidioksidipäästöjä. Digitalisaatio näyttäytyy mahdollisuutena yhdistää bruttokansantuotteen kasvu kokonaishiilidioksidipäästöjen vähenemiseen, kun esimerkiksi tuotteita korvataan palveluilla tai liikkumisesta johtuvat päästöt vähenevät etäyhteyksien ansiosta.

Afryn Teknologiateollisuudelle tekemän vähähiilitiekarttaraportin (15.5.2020 versio) mukaan ICT-alan kädenjälki on huomattava ja tietotekniikkaklusterin ilmastopäästöjä vähentäväksi potentiaaliksi on arvioitu vähintään 5 Mt hiilidioksidiekvivalenttia vuodessa.²⁶¹ Alan tuottamilla ratkaisuilla on myös keskeinen rooli muiden sektoreiden ja toimialojen päästövähennysten mahdollistajina. Tällaisia avainteknologioita ovat muun muassa tietoliikennetarkaisut, kyberturvallisuus sekä IoT- ja sensortechniikka yhdistelevät paikalliset ratkaisut.

Kun ICT:stä haetaan ratkaisua ilmastonmuutokseen tai ympäristön tilan heikkenemisen aiheuttamiin ongelmiin, on huomioitava, että ICT-teknologia ei itsessään yksin tarjoa ratkaisua, vaan ratkaisevaa on se, miten ja millaisiin käyttötapauksiin teknologiaa hyödynnetään – ja miten tämä muuttaa perinteisiä ilmastonmuutosta aiheuttavia ja luonnonvarojen ylikulutukseen johtavia toimintatapoja.

Arvion mukaan seuraavan kymmenen vuoden aikana ICT-sektorin tutkimukseen ja tuotekehitykseen tullaan käyttämään globaalisti noin 3000 miljardia euroa.²⁶² Uusien ratkaisujen ja palvelujen kehityksessä on tärkeää kiinnittää erityistä huomiota niiden ilmasto- ja ympäristövaikutuksiin, jotta teknologioiden käyttöönotto tukee yhteisiä tavoitteita ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi ja päästöjen vähentämiseksi.

ICT-teknologioilla on mahdollisuus yhdistää ihmiset, koneet, laitteet ja esineet helpottaen kommunikointia ja tarjoten mahdollisuuden seurata ympäristöämme ja sen tilan kehittymistä. Voimme myös analysoida erilaisten toimenpiteiden vaikutuksia ja korjata ja optimoida toimintaamme kerätyn tiedon perusteella. Nykyisistä ympäristöä kuormit-

²⁶⁰ Ericsson 2020: A quick guide to your digital carbon footprint.

²⁶¹ Alan omaa jalanjälkeä ei ole laskettu mukaan tässä arviossa.

²⁶² https://gesi.org/storage/files/DIGITAL%20WITH%20PURPOSE_Summary_A4-WEB_watermark.pdf

tavista toimintamalleista voidaan kehittää puhtaampia ja vähemmän kuormittavia kerättyä dataa ja erilaisilla digitaalisilla työkaluilla tuotettuja ennusteita hyödyntämällä. Optimoinnin ja toiminnan tehostamisen osalta automaatiotason kasvattaminen tuo myös uusia hyötyjä prosessien ja järjestelmien toimintaan.

Seuraavissa osioissa on kuvattu ICT-ratkaisujen avulla saatavia potentiaalisia ilmasto- ja ympäristöhyötyjä eri aloilla ja käyttökohteissa.

8.1. ICT hiilineutraalin ja resurssitehokkaan yhteiskunnan mahdollistajana

YK on määritellyt 17 kestävän kehityksen tavoitetta (Sustainable Development Goals, SDG), jotka pyritään saavuttamaan vuoteen 2030 mennessä.²⁶³ Nämä tavoitteet pyrkivät vastaamaan globaalihaasteisiin ja antavat suuntaa tulevaisuuden kehitykselle. Osa tavoitteista liittyy ilmastomuutoksen torjuntaan, ympäristön saastumisen vähentämiseen ja luonnon monimuotoisuuden säilyttämiseen, osa puolestaan ihmisten tasa-arvoisten taloudellisten mahdollisuuksien ja sosiaalisen yhdenvertaisuuden edistämiseen. Kaikki tavoitteet kytkeytyvät kuitenkin myös toisiinsa.

Teknologisella kehityksellä ja ICT-teknologioiden onnistuneella hyödyntämisellä nähdään tulevaisuudessa olevan iso rooli usean asetetun tavoitteen toteutumisen kannalta. Digitaaliset teknologiat voivat auttaa eri sektoreiden pyrkimyksiä energiatehokkuuteen, hiilineutraaliuteen, prosesseissa syntyvän hukkan minimoimiseen, materiaalikulutuksen vähentämiseen ja kiertotalouden edistämiseen. Yhdessä eri sektorit voivat edesauttaa yhteiskunnan kestävän kehityksen tavoitteiden toteutumisessa, mutta teknologian oikeanlaiseen käyttöön tulee kiinnittää huomiota, jotta sen käyttö ei johda päinvastaiseen lopputulokseen. Oikeanlaiset kannustimet, yhteiset toimintaperiaatteet ja panostukset uusien digitaalisten toimintatapojen paremman ymmärtämisen luomiseksi voivat ohjata kehitystä myönteiseen suuntaan.

8.1.1. Älykkäät kaupungit ja asuminen

Yhä suurempi määrä ihmisistä asuu tulevaisuudessa erikokoisissa kaupungeissa. Noin 70 prosenttia kasvihuonepäästöistä syntyy kaupunkien alueella.²⁶⁴ Kestävästi kehittyvät älykkäät kaupungit tarvitsevat tulevaisuudessa toimintoihleen ja palveluillleen yhä monipuolisemman viestintäverkon sekä ICT:tä hyödyntävän älykkään perinteisen infrastruktuurin.

Tulevaisuuden kaupunkien digitaaliseen infrastruktuuriin kytkeytyneillä laitteilla ja esineiden internetiä hyödyntävillä sensoreilla kerätyn datan avulla voidaan muodostaa reaaliaikainen kuva kaupungin toimivuudesta ja tätä hyödyntäen ohjata kaupungin toimintoja kohti tehokkaampaa, ympäristöystävällisempää ja kaupunkilaisten tarpeita pa-

²⁶³ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>

²⁶⁴ https://mirror.unhabitat.org/downloads/docs/E_Hot_Cities.pdf

remmin palvelevaa kokonaisuutta. Älykkään kaupungin infrastruktuurista ja toiminnallisuuksista kerätty data ja sen pohjalta tehdyt päätelmät auttavat kaupunkia hallitsemaan resursseja paremmin ja tarjoamaan asukkaille entistä toimivampia palveluja parantaen koko kaupungin toimivuutta ja asukkaiden arjen sujuvuutta ja asumisviihtyvyyttä.

Kerätyn datan perusteella kaupungin eri toimintoja voidaan seurata ja myös mallintaa optimaalisen toimintatavan löytämiseksi. ICT-ratkaisujen avulla voidaan parantaa kaupungin toimintojen energiatehokkuutta, vastata tehokkaammin ihmisten liikkumistarpeisiin, optimoida sähkön, lämmön, käyttöveden ja jäteveden verkostoa, parantaa kaupungin turvallisuutta ja kehittää uusia palveluja.

Esimerkiksi joukkoliikenteen kokonaisuutta voidaan optimoida muuttuvien olosuhteiden mukaan ja vähentää ilmastovaikutuksia samalla parantaen asiakaskokemusta. Joukkoliikennejärjestelmään liittyvien ajoneuvojen hallinnointia voidaan osittain automatisoida, jolloin päästään tehokkaampaan joukkoliikenteen toimivuuteen. Erilaisten taustajärjestelmien ja verkkoon kytkeytyneiden kameroiden ja sensorien avulla muodostettuja reaaliaikaisia liikenne- ja olosuhdetietoja hyödyntämällä voidaan tarjota luotettavia ja tarkkoja reittitietoja, joiden avulla liikkuminen on tehokasta ja siirtymisiin kuluva aika tarkemmin ennakoitavaa.

Tulevaisuudessa älykkäiden kaupunkien joukkoliikenteessä hyödynnetään yhä enemmän myös verkottuneita ja uusia teknologioita hyödyntäviä automatisoituja ajoneuvoja. Joukkoliikenteen toimivuuden ja tehokkuuden, reiteillä kuluvan ajan ennustettavuuden ja uudenlaisia digitaalisia alustoja hyödyntävien liikkumispalvelujen yleistymisen odotetaan osaltaan johtavan yksityisautoilun tarpeen vähenemiseen ja siten liikenteestä syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen vähenemiseen. Liikkumisdatan ja tekoälyn avulla voitaisiin toteuttaa uudenlaisia kannustinjärjestelmiä. Esimerkiksi, mikäli tekoäly havaitsee henkilön käyttävän paljon julkista liikennettä yksityisautoilun sijaan, voisi henkilölle kertyä rahakkeita, joita hän voisi hyödyntää julkisissa palveluissa, esimerkiksi liikuntapaikkamaksuina.

Älykkäät kaupungit tarvitsevat entistä kehittyneempiä älykkäitä verkostoja muun muassa sähkön, lämmön ja veden jakeluun. Sähköjärjestelmän osalta tärkeä kehityskulku on vaihtelevan uusiutuvan sähköntuotannon kuten tuulivoiman ja aurinkosähkön nopea lisääntyminen. Tämän uuden sääriippuvaisen tuotannon integrointi sähköjärjestelmään ja –markkinoille edellyttää digitaalisia ratkaisuja uusien tuotanto- ja kysyntäjousteratkaisuiden kehittämistä. Digitalisaatio mahdollistaa energiankysynnän joustoa mahdollistamalla sähkön- ja lämmönkulutuksen älykästä automatisoitua mittausta ja eri energiajärjestelmän reagoitua mittaustietoihin ja dynaamisiin hintatietoihin.

Toteutuneita ja ennakoituja energiankulutustietoja sekä energianhintatietoja voidaan hyödyntää yhdessä muun muassa kiinteistöautomaatiojärjestelmien, sähköautojen latausjärjestelmien, prosessinohjausjärjestelmien ja kaukolämmöntuotantoteknologioiden kanssa energiankysynnän joustojen lisäämiseksi. Sähköjärjestelmässä älymittarit ovat jo Suomessa yleisiä. Suurteollisuudessa kysyntäjoustoa on tehty pitkään, mutta pienteollisuudessa, yksityistalouksissa ja sähköautojen latausinfrastruktuurissa kehitys on alkuvaiheessa.

Sähkön ohella myös veden ja lämmön jakelu tulee hyötymään digitalisaatiokehityksestä. Erilaisten sensorien ja suorituskkyisten verkkojen avulla laitosten ohjausta voidaan muuttaa kasvavasti etäohjatuksi. Verkostoissa tapahtuvia vuotoja voidaan tunnistaa tehokkaasti ja ajoissa sekä reagoida näihin nopeasti huoltotoimenpiteillä. Esimerkiksi käyttöveden laatua ja kulutusta voidaan seurata reaaliaikaisesti ja selvittää ja paikallistaa mahdollisten poikkeamien syyt tehokkaasti. Kaukolämmön etäluennasta on jo tullut tapa.

Älykkäät rakennukset hyödyntävät digitaalisia ratkaisuja joiden avulla ne mukautuvat kulloisiinkin olosuhteisiin ja käyttötarpeisiin. ICT-ratkaisut voivat auttaa energiatehokkuuden parantamisessa esimerkiksi säättämällä tilojen lämmitystä, ilmastointia ja valaistusolosuhteita kulloisenkin käyttötarpeen mukaisesti ja laskemalla niitä silloin, kun tilassa ei ole käyttäjiä. Energian säästäminen automaation avulla on yksi keskeinen IoT-sovellusalue. Nykyisin esimerkiksi huoneistokohtainen lämpötilan mittausta voidaan toteuttaa kustannustehokkaasti langattomilla lämpöantureilla. Kun lämmönohjausjärjestelmä tietää huoneistojen lämpötilan, voidaan lämmitystä optimoida ja tarpeetonta lämmitystä vähentää.

On arvioitu, että esimerkiksi kerrostalossa voidaan huoneistokohtaisen lämmönmittausdatan avulla saavuttaa jopa 10 % energian säästö, joka vastaa noin kuukauden lyhennystä lämmityskauteen.²⁶⁵ Älykkäät rakennukset voivat optimoida toimintojaan automaattisesti sensoreihin, koneoppimiseen ja tilojen käytöstä kerättyyn historiadataan ja siihen pohjautuviin ennusteisiin sekä olosuhdedataan pohjautuen. Hyödyntämällä rakennusten pintoja tehokkaasti esimerkiksi aurinkovoiman tuotantoon, älykkäät rakennukset voivat toimia myös uusiutuvan energian lähteinä ja energiaa voidaan myös varastoida paikallisiin energiavarastoihin.

Jo rakennuksen ja rakentamisen suunnittelussa käytettävät ohjelmistot voivat mahdollistaa kasvihuonekaasupäästöjä minimoivat valinnat koko rakennuksen elinkaaren ajaksi. Maailmanlaajuisesti rakennettu ympäristö aiheuttaa noin 30 % kasvihuonekaasupäästöistä, 40 % primäärienergiankulutuksesta ja 50 % raaka-aineiden kulutuksesta²⁶⁶, joten tällaisten ratkaisujen hyödyt voivat olla hyvin suuret.

Tulevaisuudessa globaalin väestömäärän ja ostovoiman kasvu voimistaa tuotteiden kulutusta ja siten myös erilaisten materiaalien kulutusta. Globaalin materiaalinkäytön ennustetaan yli kaksinkertaistuvan vuodesta 2011 vuoteen 2060 mennessä.²⁶⁷ Teknologian kehitys ja tuotteiden elinkaarisuunnittelu auttaa tehostamaan materiaalien käyttöä ja siten pystytään välttämään tilanne, jossa tarve materiaalien tuotantoon kasvaisi samassa suhteessa tuotteiden määrän kasvun kanssa. Nykyisten materiaalien uusiokäyttö ja kiertotalouden tehokas toteuttaminen vaatii ICT-ratkaisujen käyttöönottoa prosessin eri vaiheissa. Hyödyntämällä muun muassa IoT-ratkaisuja, koneoppimista ja lohkoketjuteknologiaa voidaan nykyiset resurssit pitää mahdollisimman tehokkaassa käytössä pidentäen samalla resurssien käyttöikää. Älykäs hyödykkeiden tai omaisuuden hallinta (intelligent assets) mahdollistaa hyödykkeen sijainnin, kunnon ja saatavuuden

²⁶⁵ <https://www.helen.fi/taloyhtiot/lampoa-talyhtiolle/energiatehokas-lammitys/kiinteistovahti>

²⁶⁶ Ympäristöministeriö.

²⁶⁷ <https://www.oecd.org/environment/waste/highlights-global-material-resources-outlook-to-2060.pdf>

den seurannan. Lisäksi hyödykkeen digitaalinen omistajuus, vaihdanta ja automatisoidut sopimukset luovat mahdollisuuden uusien palvelujen kehittämiseksi ja hyödykkeiden tehokkaalle hyödyntämiselle ja resurssitehokkuuden parantumiselle.²⁶⁸

Kaupungeissa voidaan tekoälyn avulla toteuttaa myös älykkäitä liikenteenohjausratkaisuja. Älykkäällä liikenteenohjauksella tarkoitetaan älykkäiden sensoreiden ja mittauslaitteiden hyödyntämistä liikenteen sujuvuuden parantamiseksi etenkin suurkaupungeissa. Moskovassa on yksi esimerkki tekoälyn soveltamisesta liikenteenohjaukseen: teknologiaa hyödyntämällä kaupungin ruuhkat ovat pienentyneet ja esimerkiksi parkkipaikkojen etsintään kuluva aika on kaupungissa puolittunut.²⁶⁹ Sovelluskohde vähentää suoraan liikenteen päästöjä vähentämällä matkustusaikoja, ajoneuvojen tyhjäkäyntiä ja matkustusmääriä ja sillä on positiivinen vaikutus paikalliseen ilmanlaatuun.

8.1.2. Älykäs liikenne

Tulevaisuudessa liikenteen yhteistoiminnallisten, verkottuneiden ja yhä automaattisempien liikennevälineiden ja digitalisoitujen järjestelmien kehittyminen edistää ympäristölle haitallisten päästöjen vähenemistä henkilö- ja tavarakuljetuksissa. Automaation ja tiedon hyödyntämisen avulla voidaan muun muassa optimoida reittejä ja kapasiteetteja, ja saavuttaa sitä kautta liikenteen ympäristölle haitallisten päästöjen vähenemistä. Automaatio itsessään ei yleensä suoraan synnytä päästövaikutuksia, vaan ne tulevat automaation seurauksena tapahtuvista muutoksista liikennevälineisiin, niiden toimintaan ja ohjaukseen sekä sitä kautta liikennejärjestelmään.

Tieliikenne

Tieliikenteen osalta verkottuneet ajoneuvot ja älykkäät liikennejärjestelmät tulevat tukeutumaan tulevaisuudessa yhä enemmän erilaisten informaatio- ja viestintäteknologioiden varaan. Näiden ratkaisujen avulla liikenteestä pystytään kehittämään sujuvampaa, turvallisempaa ja ympäristöystävällisempää. Liikenteen automaation kehittämisen pääajuri on tähän asti ollut tehokkuuden kasvattamisessa ja liikenneturvallisuuden sekä liikkumispalveluiden edistämiseksi, mutta päästövaikutuksiin kiinnitetään yhä enemmän huomiota.

Yksi tärkeä ajuri automaattiajoneuvojen kehityksessä on ajoneuvojen verkottuneisuus eli se, että ajoneuvot kommunikoivat suoraan toistensa, tieliikenneinfrastruktuurin, erilaisten taustajärjestelmien ja muun ympäristön kanssa. Tämän lisäksi tieliikenneinfrastruktuurin eri osat voivat kommunikoida keskenään. Tästä muodostuu verkottunut ja toisiinsa kytkeytynyt kokonaisuus, jota hyödyntämällä voidaan parantaa liikkumisen tehokkuutta ja turvallisuutta. Verkottuneet ajoneuvot voivat viestiä omasta liikkumisestaan ja havainnoimistaan liikenneolosuhteista, kuten ajokelistä, ruuhkista, hätäjarrutuksista tai liukkaista tienkohdista muille tien käyttäjille sekä saada tietoa poikkeustilan-

²⁶⁸ Ellen MacArthur Foundation 2016: Intelligent Assets: unlocking the circular economy potential.

²⁶⁹ ITU (International Telecommunications Union) 2020: Frontier technologies to protect the environment and tackle climate change.

teista, kuten onnettomuuksista ja suljetuista ajokaistoista. Tiedon lisääntyminen ja jakaminen parantaa liikenteen tehokkuutta ja sujuvuutta ja voi myös siten auttaa päästöjen vähentämisessä.

Tieliikenteen automaatioissa on viisi eri tasoa, ja korkean tason automaatiosovelluksia kehitetään niin osana yksityisomisteisia ajoneuvoja kuin osana julkista ja joukkoliikennettä. Liikennejärjestelmätasolla muutosten suuruus riippuu siitä, kuinka suuri osa liikenteestä olisi automatisoitu. Automaation kehittymisestä Suomessa on esitetty erilaisia arvioita.²⁷⁰ Seuraavan kymmenen vuoden aikana tieliikenteen automaation merkitys liikennejärjestelmätasolla on vähäinen, sillä esimerkiksi moottoriteillä tapahtuvaa autopilottiajtoa ajoneuvokannasta tukisi noin 1,2–3,5 % ja automaattisia kuljetusajoneuvoja olisi noin 0,4–2,8 %.²⁷¹ Vaikutusten suuruuteen vaikuttaa myös se ovatko ajoneuvojen automaatiotoiminnot tiedottavia, suosituksia antavia vai pakottavia.

Tieliikenteen automaation osalta ympäristövaikutukset voivat olla myös päästöjä kasvattavia, jos sen seurauksena liikennesuorite lisääntyy tai kulkumuotojakaumassa tapahtuu siirtymiä pois vähäpäästöisistä liikkumistavoista. Seuraavaksi esitellyillä osatoimenpiteillä voitaneen vähentää päästöjä myös Suomessa.

Ensiksi ajoneuvojen tekniikan ja toiminnan automatisoinnilla voidaan vähentää ajoneuvojen energiankulutusta ja päästöjä muun muassa ajotavan tehostamisen ja niin sanotun ekoajamisen kautta. Tällöin automaattisen ajoneuvon ajotapaa ohjelmoidaan tarpeettomia kiihdytyksiä ja jarrutuksia välttäväksi. Myös päästöjen kannalta optimaalista ajonopeutta voidaan sovittaa sopivaksi vallitseviin olosuhteisiin. Samalla onnettomuusriskiä voidaan pienentää ja tämän seurauksena onnettomuuksien vähentyessä myös päästöt vähenevät onnettomuuksista aiheutuvien ruuhkien vähentyessä.

Toiseksi ympäristövaikutuksia saadaan myös lisäämällä ajoneuvojen välistä, ajoneuvojen ja infran sekä ajoneuvojen ja laitteiden välistä viestintää. Näillä voidaan vähentää päästöjä muun muassa hyödyntämällä letka-ajoa, jossa rekat kulkevat viestintäyhteyksien ohjaamana tiiviissä letkassa lähellä toisiaan, jolloin muun muassa ilmanvastuksen vaikutusta polttoaineenkulutukseen saadaan pienennettyä. Verkottuneet ajoneuvot voivat myös kommunikoida ja välittää olosuhdeviestejä yksittäisen ajoneuvon optiminopeuden valitsemiseksi ja kokonaisuutena liikennevirran optimoimiseksi.

Kolmanneksi kytkemällä tieliikenteen automaatio ja verkottuneisuus osaksi olemassa olevaa joukkoliikennejärjestelmää, saadaan aikaan liikkumistapojen kestävää muutosta, joka vähentää liikennejärjestelmän päästöjä. Esimerkiksi keskeisten joukkoliikenneväylien syöttöliikenteessä voisivat toimia automatisoidut tai etäohjatut pienlinja-autot

²⁷⁰ EU-EIP, aktiviteetti 4.2. ja LVM: liikenteen automation lainsäädäntö- ja toimenpidesuunnitelma.

²⁷¹ https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/EU_EIP_Impact_of_Automated_Transport_Finland_Trafficom_6_2019.pdf

ja robottitaksit. Myös erilaiset yhteiskäyttö- ja kyydinjakopalvelut kehittyvät tulevaisuudessa. Joukkoliikenteen kanssa yhdistettynä ne voivat tarjota vähennyksiä kokonaispäästöihin.^{272,273,274}

Tieliikenteen sähköistyessä ratkaisuja tarvitaan myös sähköautojen latausinfrastruktuurin järjestämiseksi. Älykkäillä järjestelmillä voidaan luoda kulutusjoustoja ja sähkövarastoja, mikä pienentää tarvetta erityisesti fossiilisiin polttoaineisiin perustuvan huippu-tehon käyttöön.

Rautatieliikenne

Rautatieliikenteen potentiaali päästöjen vähentämisessä realisoituu ennen kaikkea rautatiekuljetusten markkinaosuuden ja siihen tarvittavan kapasiteetin kasvattamisen myötä. Digitalisointi mahdollistaa automaation lisäämistä raiteilla ja sitä kautta tehokkuuden, täsmällisyyden ja kapasiteetin paranemista. Parempi ja täsmällisempi junatarjonta tukee siirtymää ympäristön kannalta kestäviin liikkumismuotoihin, parantaa rautateiden houkuttelevuutta ja lisää rautatiekuljetusten markkinaosuutta.

Rautatieliikenteen osuuden liikenteen kasvihuonepäästöistä arvioidaan olevan nykyhetkellä vain noin 1 %:n luokkaa, koska Suomen rataverkko on pääosin sähköistetty ja junat liikennöivät suurelta osin uusiutuvasti tuotetulla sähköllä. Rautatieliikenteen suurempi markkinaosuus vähentäisi merkittävästi liikenteen päästöjä. Nykyhetkellä markkinaosuus koko liikenteessä on matkustajaliikenteessä noin 6 % ja tavaraliikenteessä 27 %. Rautatieliikenteen osuuden kasvattaminen on EU:n laajuinen tavoite, joka on esillä vahvasti muun muassa Euroopan vihreän kehityksen *Green deal* -ohjelmassa.

Ilmastoneutraaliuteen siirtyminen edellyttää älykästä infrastruktuuria. Digitalisoinnin ja sen mahdollistaman tehokkuuden lisääntymisen avulla raiteille voitaisiin saada jopa 30 % lisää kapasiteettia. Digirata-hankkeessa on kartoitettu, miten ratakapasiteettia voidaan hyödyntää tehokkaammin. Digitalisaation avulla on mahdollista tihentää vuorovälejä ja siten kasvattaa rataverkon kapasiteettia. Tämä vähentää rataverkon pullonkauloja, nopeuttaa häiriöistä toipumista, helpottaa aikataulusuunnittelua ja parantaa täsmällisyyttä, joka puolestaan lisää rautateiden houkuttelevuutta sekä suorituskykyä.

Rautateiden digitalisointi mahdollistaa tulevaisuudessa rautatieliikenteen automaation lisäämisen *Grade of Automation* (GoA) -tasolle 1-4. Tasolla 1 veturinkuljettaja ohjaa junaa, mutta automaattinen junien kulunvalvontajärjestelmä suojaa junan kulkua. GoA-tasolla 2 juna liikkuu automaattisesti, mutta kuljettaja käynnistää automaattiajon ja kuljettaja voi operoida junan ovia ja tarkkailla junan kulkua. GoA-tasolla 3 juna liikkuu täysin automaattisesti, mutta henkilökunta on paikalla poikkeustilanteiden varalta.

²⁷² Makridis ym. 2020: The impact of automation and connectivity on traffic flow and CO₂ emissions. A detailed microsimulation study. Atmospheric Environment.

²⁷³ Stogios ym. 2019: Simulating impacts of automated driving behavior and traffic conditions on vehicle emissions. Transportation Research Part D.

²⁷⁴ Wadud ym. 2016: Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. Transportation Research Part A.

GoA-tasolla 4 juna liikkuu automaattisesti, eikä henkilökuntaa junassa ole edes erikoistilanteita varten. Automaatiotason kehittymisen myötä edellä mainittuja hyötyjä voidaan edelleen lisätä.

Merenkulku

Merenkulussa automaatiotratkaisuja on jo nykyisinkin käytössä esimerkiksi laivan reitin ja kulkuasennon optimoinnissa. Automaatiotason kehittyessä aluksen operaattori voi tulevaisuudessa olla maissa ja kontrolloida useampia aluksia kerrallaan. Samalla kehittyneemmät ratkaisut mahdollistavat arvioiden mukaan muun muassa merikuljetusten integroinnin osaksi logistista kokonaisjärjestelmää nykyistä tehokkaammin, mikä vähentäisi polttoaineen kulutusta ja samalla päästöjä. Myöhemmin tulevaisuudessa alukset voisivat toimia autonomisesti, jolloin operaattorilla ei olisi vahvaa roolia, vaan alus toimisi täysin itsenäisesti.

Ilmailu

Ilmailun automaatio on osa miehittämättömän ilmailun kokonaisuutta, joka kasvaa voimakkaasti muun muassa droonien kautta. Drooneilla voidaan tehdä esimerkiksi viimeisen etapin toimituksia eli siirtää pakettikuljetuksia ruuhkista ja autojen kyydistä ruuhkatomampaan ilmakuljetukseen. Tästä on jo ensimmäisiä kokeiluja Suomessa. On nähtävissä, että miehittämättömän ilmailu laajentuu tulevaisuudessa myös matkustajien ja rahdin kuljettamiseen, mutta tämä kehitys ottaa aikansa ja vaatii vielä paljon kehitystä. Positiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia voidaan tulevaisuudessa saada ICT-tekniologioita hyödyntävän automatisoidun lennonjohdon ja myös ruuhkaisilla alueilla tapahtuvan lentoreittien vapaan optimoinnin myötä.

Luvussa 9.1. käsitellään tarkemmalla tasolla tieto- ja viestintäsektorin logistiikka-alalle tuomia mahdollisuuksia ja ratkaisuja ilmasto- ja ympäristövaikutusten minimoimiseen.

8.1.3. Digitalisoituva teollisuus

Digitalisaation avulla toiminnan tehokkuutta parantavaa teollisuuden murrosta nimitetään neljänneksi teolliseksi vallankumoukseksi (Industry 4.0). Tämä käynnissä oleva murros etenee koko kuluva vuosikymmenen ajan. Tieto- ja viestintäratkaisulla toteutettava teollisuuden automaatiotason kasvaminen parantaa toiminnan energia- ja materiaalihyökyä, työturvallisuutta, tehostaa tuotantoprosesseja sekä toimitusketjuja vahvistaen samalla teollisen toiminnan kilpailukykyä. Keskiössä murroksessa ovat tehokkaiden langattomien teknologioiden kuten 5G:n, teollisen esineiden internetin ja koneoppimisen soveltaminen, datan tehokas hyödyntämien sekä ihmisen ja koneen välisen vuorovaikutuksen kehittäminen muun muassa teollisten tuotantoprosessien optimoinnissa, resurssien tehokkaassa hyödyntämisessä, laadun parantamisessa ja hukan minimoimisessa.²⁷⁵

Teknologioiden kehittymisen myötä on jo nähtävissä polku teknologian tehostamasta teollisuudesta (Industry 4.0) ihmisten ja koneiden yhteiselön mahdollistaman joustavan

²⁷⁵ Stock & Seliger 2016: Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. Procedia CIRP.

ja kestävä tuotannon (Industry 5.0) kautta aina vahvaan, ei-hauraaseen teollisuuteen (Industry 6.0).²⁷⁶ Neljäs teollinen vallankumous yhdistää järjestelmiä ja luo analytiikkaan pohjautuvaa päätöksentekoa, kun taas viidennessä teollisessa vallankumouksessa koneoppimisen rooli kasvaa tavoitteena ihmisen ja koneen yhä tiiviimpi vuorovaikutus, joka mahdollistaa entistä ympäristöystävällisemmät tuotantotavat sekä teollisuuden uudistumisen. Kuudennessa teollisessa vallankumouksessa visioidaan tuotantoa entistä personoidumpana ”palveluna”, joka huomioi kestävä kehityksen entistä laajemmin, ei vain ympäristön näkökulmasta.

Uusien teknologioiden kuten tekoälyn ja lisätyn todellisuuden avulla toteutetut etäavustus ja -neuvontaratkaisut voivat tulevaisuudessa avustaa työntekijöitä esimerkiksi huolto- ja asennustoimenpiteissä tehden toimenpiteistä nykyistä tehokkaampia ja turvallisempia suorittaa. Näin esimerkiksi erilaisten koneiden ja laitteiden kokoonpano voidaan hoitaa siten, että kokoonpanon inhimilliset virheet saadaan jopa poistettua kokonaan tai vähennettyä merkittävästi. Automaatio myös muuttaa työtehtäviä turvallisemmiksi laskien työtapaturmien määrää sekä altistumista työperäisiin sairauksiin. Tekoälyä hyödyntäen voidaan myös optimoida tehtaalla liikkuvien robottien, koneiden ja ihmisten kulkureitit ja parantaa turvallisuutta ja tehokkuutta.

Erilaisia ongelmatilanteita voidaan ratkaista tuotantoprosessista kerätyn datan ja asiantuntijoiden etäläsnäolon mahdollistavien ratkaisujen avulla ilman kokoonpanon pidempiaikaista seisahtumista. Tuloksena valmistettavien tuotteiden asiakaspalautukset voidaan minimoida, mikä vähentää tuotteiden kuljetustarvetta ja kasvihuonekaasupäästöjä. Myös laadultaan heikkojen tuotteiden mahdollisesti aiheuttamien vahinkojen ja laiterikkojen määrää voidaan vähentää, joka edesauttaa kokonaistehokkuutta ja vähentää näistä aiheutuvaa turhaa energiankulutusta.

Yhtenä esimerkkinä ICT-ratkaisujen avulla saavutettavista hyödyistä voidaan mainita VTT:n yhdessä metsäteollisuuden ja automaatioyrityksen kanssa kehittämä mittausdata ja tekoälyn perustuvan ohjaus- ja automaatiojärjestelmä, jonka ansiosta sama määrä selluloosaa voidaan tuottaa merkittävästi vähemmällä raakapuun käytöllä. Yhden sellutehtaan osalta säästetään noin 700 rekkakuormaa, joka vastaa 2–3 % käytetävästä raakapuusta vuodessa. Automaatiojärjestelmän sähkönkulutus on saman suuruinen kuin vanhemman sukupolven järjestelmissä. Pienentyneen puuntarpeen ilmastovaikutus syntyy kolmella mekanismilla: säästyneisiin puihin sitoutunut hiili pysyy metsässä, ajamattomat 700 rekkakuormaa eivät tuota päästöjä ja pienempi raaka-aineen käyttö vähentää päästöjä tehtaalla.²⁷⁷

Toisena esimerkkinä ICT:n tuomista parannuksista on Elisan toteuttama ratkaisu sähköauton akkukennojen valmistajalle. Haasteena oli epävakaa tuotannon laatu korkealla syntyvän hukun määrällä, sekä aikaa vievä yritykseen ja erehdykseen pohjautuva lähestymistapa tehokkuuden parantamiseksi. Uutena ICT-ratkaisuna integroitiin OT (Operational Technology) -ympäristö tuotannon datajärveen, jonka jälkeen osoitettiin

²⁷⁶ Allied ICT Finland 2020: Whitepaper by Allied ICT Finland - From Industry X to Industry 6.0 – Antifragile Manufacturing for People, Planet, and Profit with Passion (draft).

²⁷⁷ Saarela & Poukka 2017: On-Line Pulp Quality Information. Automaatiopäivät 22.

ennustavalla laadun analysoinnilla mitkä tietomallit todellisuudessa vaikuttavat akkukennon laatuun. Toteutetun ratkaisun avulla prosessissa syntyvän hukan määrän aleni 15–19 %.²⁷⁸

Teollisuuden osalta merkittävässä roolissa nähdään myös materiaalia lisäävät valmistusteknologiat (Additive Manufacturing, AM), joista käytetään myös termiä 3D-tulostus. Nämä ovat teknologioita, joilla voidaan digitaaliseen malliin pohjautuen valmistaa komponentteja paikallisesti. Nämä teknologiat ovat kehittyneet vahvasti viimeisten vuosien aikana. Tulostettavien materiaalien ja komponenttien sekä tuotteiden määrä on kasvanut ja teknologioita hyödynnetään yhä laajemmin erilaisessa käyttökohteissa. Digitaalisesti optimoitujen mallien sekä kehittyneiden materiaalien avulla tulostaen komponenteista voidaan valmistaa kevyempiä ja kestävämpiä kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä. Myös uusiutuvista raaka-aineista valmistettuja materiaaleja otetaan käyttöön yhä enemmän.

Näiden teknologioiden uskotaan tulevaisuudessa täydentävän tai jopa korvaavan nykyisiä valmistusmenetelmiä muuttaen valmistavaa teollisuutta ympäristön kannalta kestävämpään suuntaan. 3D-tulostus tukee kiertotaloutta tuotteiden, koneiden ja laitteiden joustavan varaosatuotannon ja uusien kehittyneiden materiaalien mahdollistaman pidemmän käyttöiän kautta. Materiaaleja lisäävässä valmistamisessa raaka-ainemateriaaleja saadaan hyödynnettyä varsin tehokkaasti valmistusprosessin aikana verrattuna materiaalia poistaviin ja muovaaviin tekniikkoihin (esimerkiksi jyrsintä ja valu), jossa materiaalihukan osuus lopputuotteeseen nähden voi olla hyvinkin suuri. Tämän lisäksi tulostusteknologioissa ylijääneistä materiaaleista suurin osa voidaan käyttää uudelleen ja tällä hetkellä parhaimmillaan noin 80 % ylijäämämateriaalista voidaan hyödyntää seuraavassa tuotantoerässä.²⁷⁹

8.1.4. Ratkaisut luonnonvara-alalla

ICT-ratkaisuja laajasti hyödyntävällä maataloudella (smart farming) on mahdollisuus muodostaa tarkka tilannekuva ja reagoida kulloisiinkin muutoksiin oikea-aikaisesti ja tarkoituksenmukaisesti. Ratkaisuilla on merkitystä myös maatalouden tuottavuuden kasvattamisessa ja ilmastomuutokseen sopeutumisessa. Kun aiemmin esimerkiksi koko pelto saatettiin käsitellä samalla tavalla, voidaan älykkäiden järjestelmien avulla tarvittavat toimenpiteet kohdentaa juuri oikeaan paikkaan ja oikeaan aikaan. Tämä voidaan toteuttaa sensoreilla ja kuvantamisella tuotetun datan ja siitä muodostetun tilannekuvan perusteella. Datan keräämiseen voidaan hyödyntää erilaisia verkkoon kytkettyjä antureita, joiden avulla kasvupaikoista saatua dataa voidaan yhdistää esimerkiksi droneilla tai satelliiteilla kuvattuun aineistoon. Näiden avulla pystytään digitaalisesti muodostamaan tilannekuva kasvien sen hetkisestä tilasta, mahdollisesta ravinteiden ja veden puutoksesta, kasvitaudeista, maaperän kasvuolosuhteista sekä näiden perusteella tarvittavista toimenpiteistä.

Paikalliset maaperä- ja kasvuolosuhdetiedot sekä sääennustetiedot voidaan ottaa tarkasti huomioon suunnitellessa muun muassa kastelun, lannoituksen ja torjunta-aineiden käyttöä. Pidemmällä tulevaisuudessa toimenpiteitä voidaan suorittaa jopa automaattisesti droonien tai muiden autonomisten koneiden avulla. Täten voidaan tehostaa

²⁷⁸ <https://www.elisasmartfactory.com/case-study-battery-production/>

²⁷⁹ <https://www8.hp.com/uk/en/printers/3d-printers/materials.html>

tuotannon prosesseja ja saada parempaa tietoa toimenpiteiden vaikutuksesta samalla välttyen ylimääräiseltä ympäristön kuormittamiselta. Tällöin voidaan vähentää tarpeetonta koneiden käyttöä ja niiden aiheuttamaa maan pinnan kulumista sekä ajossa tuotettuja kasvihuonekaasu- ja pienhiukkaspäästöjä. Peltojen hiilihävikin estäminen pitämällä maa kasvipeitteisenä ja maan hiilipitoisuuden ylläpito tai kasvattaminen ovat tutkimuksen kohteena olevia keinoja vähentää maatalousmaiden kasvihuonekaasupäästöjä. Myös lannan biokaasutuksen yleistyminen auttaa maataloussektorin kasvihuonekaasupäästöjen alentamisessa. Teknologialla on keskeinen rooli ilmasto- ja ympäristövaikutuksien selvittämisessä ja vähentämisessä.

ICT-ratkaisut tuovat tulevaisuudessa hyötyjä metsätalouden toimintakentälle muun muassa metsän tilan ja kasvun seurannan, tehokkaan hoidon, myrskyjen aiheuttamien tuhojen seurannan ja tuholaitosten torjunnassa kasvavan automatisoitumisen ja tehostumisen muodossa. Erilaisten satelliitti- tai droonipohjaisten kuvantamiskäytösten avulla voidaan saada tietoa metsän tilasta, sen biomassan koosta sekä tämän pohjalta laskettuna metsän toiminnasta hiilinieluna. Kuvantaminen mahdollistaa ajoneuvopohjaisen seurannan vähentämisen, jonka ansiosta siitä aiheutuvat päästöt vähenevät ja ajamisesta aiheutuvilta maan pinnan vaurioilta voidaan osin välttyä. Kuvantamisella voidaan myös kerätä tehokkaasti tietoa metsäpaloista ja ohjata sammutustoimenpiteitä nopealla aikataululla - vähentäen metsäpalojen johdosta ilmakehään vapautuvan hiilidioksidin määrää.

Valtioneuvoston helmikuussa 2019 julkaiseman maa- ja metsätaloussektorin päästöjä käsittelevän selvityksen²⁸⁰ mukaan metsien hiilinielut ovat ratkaisevassa asemassa, kun tarkastellaan maankäytön, maankäytön muutoksen ja metsätaloussektorin mahdollisuuksia edistää Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamista. Digitaaliset ratkaisut voivat edesauttaa hiilinielua lisäävää metsänhoitoa.

8.1.5. Julkiset palvelut

Digitalisoituvalla terveydenhuollolla tavoitellaan muun muassa terveydenhuollon kokonaistehokkuuden kasvattamista, kustannussäästöjä sekä kattavien hoiva- ja hoitopalvelujen saatavuutta entistä enemmän myös paikasta riippumatta. Tavoitteisiin voidaan päästä esimerkiksi virtuaalisten kanavien ja ratkaisujen avustaman terveydenhoidon ja tietoliikenneyhteyksiä tehokkaasti hyödyntävän etähoitamisen ratkaisujen avulla. ICT-ratkaisut tarjoavat hyötyjä myös terveyden edistämisen ja sairauksien ennaltaehkäisemisen osalta etäseurantaa ja monitorointia hyödyntämällä.

Erilaisten päätelaitteiden kuten älypuhelimien yleistymisen myötä terveydentilan monitoroinnista on tullut helpompaa ja teknologian kehittyessä myös tarkempaa. Terveydentilan ja aktiivisuuden tarkkailun helpottumisen myötä omaan terveyteen panostamisen on noussut tärkeämmäksi. Dataa ja teknologiaa hyödyntävä ennakoiva terveydenhuolto pyrkii edistämään terveyttä ja ennaltaehkäisemään ongelmia jo ennen niiden ilmenemistä. ICT-ratkaisuilla on tässä yhteydessä tunnistettava rooli.

Sensoreiden kehittymisen ja suorituskykyisten tietoliikenneverkkojen laajenemisen myötä potilaiden etähoitamisen ja tarkkailun mahdollisuudet paranevat. Potilas voi itse

²⁸⁰ Aakkula ym., 2019: Maatalous- ja LULUCF-sektorien päästö ja nielukehitys vuoteen 2050. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminta.

jakaa sensorien keräämää dataa verkon yli lääkärille ja lääkärin analysoitua datan hän voi päivittää potilaan hoitosuunnitelmaa ilman että potilas varaa ajan ja matkustaa erikseen lääkärin vastaanotolle tietyssä ajanhetkenä. Tämä vähentää liikkumisen tarvetta, mistä on hyötyä myös siinä tapauksessa, että potilaan liikkuminen on vaikeaa. Myös lääkkeiden ja muiden lääkeaineiden toimituksia voidaan tulevaisuudessa hoitaa tehokkaasti ja oikea-aikaisesti esimerkiksi drooneilla.²⁸¹

Digitalisaatio on tuonut ja tuo tulevaisuudessa yhä enemmän muutoksia myös opetukseen ja koulutukseen. Etäopiskelu on tullut yhä tehokkaammaksi verkon yli saatavilla olevien materiaalien ja virtuaalisten opetuksen yleistymisen myötä. Luentojen videointi ja niiden seuraaminen ajasta ja paikasta riippumatta on vähentänyt liikkumistarvetta. Virtuaalitodellisuuden sovelluksia voidaan kehittää mahdollistamaan käytännön tilanteita vastaavia harjoituksia, joissa opiskelijat voivat tehokkaasti oppia suorittamaan toimenpiteitä oikein ja tehokkaasti simuloituissa olosuhteissa. Myös opetushenkilökunnalta saatu konsultaatio ja ohjaus voidaan tarvittaessa järjestää digitaalisesti verkkoyhteyden yli. Kasvavasti digitaalisilla alustoilla tapahtuva opetus vaikuttaa tulevaisuudessa myös kaupunkien ja niiden joukkoliikenteen suunnitteluun, mikäli liikkumisen tarve keskitettyihin kampuksiin ja kouluihin vähenee.

ICT:hen perustuvilla julkisilla asiointijärjestelmillä voidaan myös tehostaa erilaisia päästöjen vähentämiseen tähtäävien järjestelmien hallinnointia, esimerkkinä Suomessa Energiaviraston monentasoisin ICT-ratkaisuihin perustuva päästökaupan asiointijärjestelmä ja uusiutuvan energian tuotantotuen asiointijärjestelmä. Päästökaupan asiointijärjestelmän uskotaan edistävien päästöjen johdonmukaista tarkkailua yhteisin pelisääntöin ja parantaneen päästötietojen uskottavuutta kaupanteon osapuolten välillä. Tuotantotuen järjestelmä on puolestaan mahdollistanut tuotantotukipäätösten hallinnoinnin ml. sähköntuotannon seurantajärjestelmien ja mittausten vaatimusten mukaisuuden varmistamisen.

8.1.6. Kuluttajapalvelut

Digitaalinen muutos näkyy myös kuluttajapalveluissa. Digitaalisen murroksen myötä fyysiset tuotteet korvautuvat osin virtuaalisilla tuotteilla ja digitaalisilla palveluilla, mikä voi vähentää materiaalin ja energian käyttöä. Ericsson²⁸² tarkastelee raportissaan muun muassa sitä, miten verkon yli tarjotut suoratoistopalvelut ovat syrjäyttäneet perinteiset CD-, DVD- ja Blu-ray -levyt. Raportissa on arvioitu, että kahden tunnin elokuvan suoratoisto ja katselu kannettavalta tietokoneelta kuluttaa vähemmän energiaa kuin mitä vastaavan elokuvan katselu kuluttaisi perinteiseltä DVD- tai Blu-ray-levyltä ja televisiosta katsottuna (ks. myös 2.3.). Nykyajan hyvin nettiyhteyksien kodeissa videoita voidaan välittää monille erilaisille päätelaitteille. Televisioiden energiatehokkuus on kehittänyt vuosien kuluessa, vaikka tosin samalla ruutukoot ovat kasvaneet. Tämän vuoksi televisioiden energiankulutus on pysynyt melko samana. Suurin vaikutus tulee fyysisten levyjen valmistuksesta ja niiden kuljettamisesta ja jakelusta, johon tarvitaan energiaa ja joka aiheuttaa päästöjä. Vastaava kehitys fyysisistä tuotteista kohti digitaalisia palveluita on tapahtunut musiikissa.

²⁸¹ Subbarao & Cooper Jr 2015: Drone-Based Telemedicine: A Brave but Necessary New World. The Journal of the American Osteopathic Association.

²⁸² Ericsson 2020: A quick guide to your digital carbon footprint.

Media- ja viihdeteollisuuden tulevaisuuden ratkaisut liittyvät erilaisten entistä vaikuttavien sisältöjen tuotantoon ja jakeluun. Viihde-elämysten tuottaminen muun muassa entisestään paremman videokuvan laadun avulla sekä lisätyn ja virtuaalisen todellisuuden ratkaisujen avulla on kehityksen keskiössä. Sisältöjen tuottaminen tapahtuu tulevaisuudessa entistä enemmän HD (High Definition), 4K ja 8K -tarkkuutta hyödyntäen. Myös 360-kameratekniikkaa, sekä katsojan valittavissa olevia erilaisia kuvakulmia esittäviä rinnakkaisia videokuvavirtoja tullaan tulevaisuudessa hyödyntämään yhä enemmän. Näiden päälle tullaan myös lisäämään erilaista dataa, esimerkiksi urheilutapahtumien yhteydessä voidaan urheilijoista ja urheilusuorituksista esittää suorituskyyä ja suoritusta havainnollistavia tietoja. Nämä mahdollistavat katsojalle entistä kokonaisvaltaisempien ja myös räätälöitävissä olevien media- ja viihdepalvelujen kuluttamisen. Yhä kasvava kuvanlaatu tarkoittaa kuitenkin kasvavaa prosessointi- ja tiedonsiirtotarvetta. Useat eri rinnakkaiset videotoistot myös kasvattavat siirretyn data kokonaismäärää. Näin ollen uuden tyyppiset viihdepalvelut voivat myös kasvattaa verkkojen ja päätelaitteiden energiantarvetta.

ICT voi mahdollistaa liikkumistarpeen merkittävän vähentämisen jokapäiväisen työssäkäynnin ja myös pidempien työmatkojen osalta. Työmatkustamisen osittainkin korvautuminen etäkokouksilla ja videoneuvotteluratkaisuilla vähentää matkustamisen tarvetta. Etenkin pitkänmatkan matkustaminen, jossa lennot ovat usein tarpeellisia, aiheuttavat merkittäviä hiilipäästöjä usein toistuessaan. Elisalla on tutkittu etätöiden ja paikasta riippumattoman työn vaikutusta päästöjen vähentymiseen. Tehdyn selvityksen mukaan etäkokouksilla voidaan saada aikaan keskimäärin 3,85 kg CO₂ per etäpäivä suuruinen päästövähennys. Vastaavasti on arvioitu, että välttämällä matkustamista ja käyttämällä virtuaalineuvottelupalveluja keskimääräisen päästövähennyksen suuruus olisi 2,49 kg CO₂ osallistuvaa henkilöä kohden.²⁸³

Kulutuksen näkökulmasta ICT mahdollistaa suorat päästö- ja materiaalivähennykset, kun saastuttavampi ja resurssi-intensiivisempi toiminto korvataan virtualisoidulla palvelulla. Kokonaisvaikutuksen ja pidemmän aikavälin kehityksen kuitenkin määrittää se, miten käyttäytyminen yhteiskuntien tasolla muuttuu – miten laajalti otamme uusia toimintatapoja käyttöön, miten täydellisesti ne korvaavat vanhoja malleja ja mitä uusia kulutuksen malleja ne mahdollisesti luovat. On esimerkiksi esitetty, että etätöiden lisääntymisellä saavutettavat päästövähennykset voisivat osin mitätöityä vapaa-ajanmatkustuksen vastaavalla kasvulla. Samoin media- ja viihdeteollisuuden ilmasto- ja ympäristövaikutusten tarkastelussa olisi ymmärrettävä paremmin ilmasto- ja ympäristövaikutuksia koko elinkaaren ajalta huomioiden myös kulutuskäyttäytymisen muutos, kuten mahdollinen mediasisältöjen kulutuksen merkittävä lisääntyminen.

Tarjolla ja kehitteillä on myös lukuisia kuluttajasovelluksia, joilla ihmiset voivat saada tietoa oman kulutuksensa päästövaikutuksista. Helppokäyttöiset työkalut auttavat monimutkaisista ympäristökysymyksistä kiinnostuneita kuluttajia suuruusluokkien suhteuttamisessa ja oman toiminnan vaikutusten seuraamisessa. Näiden uusien työkalujen vaikuttavuutta päästöihin on toistaiseksi enneaikaista arvioida.

²⁸³ <https://corporate.elisa.com/attachment/content/Elisa-Energy-and-CO2--emission-disclosure-2019.pdf>

8.2. Ilmaston- ja ympäristöntutkimus ja ilmastonmuutokseen sopeutuminen

8.2.1. ICT ilmastonmuutokseen sopeutumisen tukena

Vaikka ilmastonmuutoksen hillintätoimet edistyisivät hyvin, ilmaston lämpenemistä ei voida kokonaan estää. Lämpötilan ja vesiolojen nopea muuttuminen vaikuttaa luonnon-ympäristöön ja yhteiskuntaan, mikä vaatii varautumista ja sopeutumista. Tieto- ja viestintäteknologialla voidaan tukea tätä välttämätöntä sopeutumista monin eri tavoin. ICT paitsi tukee ilmastotutkimusta (ks. myös 8.2.2) ja auttaa parantamaan varautumisen kannalta olennaisia sääennusteita, tuottaa myös hyvin konkreettisia riskejä vähentäviä ratkaisuja.

Välittömiä väestöön liittyvät riskit ovat väkirikkaissa rannikkovaltioissa ja pienissä saarivaltioissa merenpinnan nousun myötä sekä jo nyt kuivuudesta kärsivillä alueilla esimerkiksi Saharan eteläpuoleisessa Afrikassa. Myös äärimmäisen kuumalle säälle altistuvien ihmisten määrä on kasvussa.²⁸⁴

Kaukokartoitusmenetelmillä, paikkatiedolla ja niihin perustuvilla riskinarvioinneilla on kasvava rooli sään ääri-ilmiöihin varautumisessa myös Suomen kaltaisissa maissa: esimerkiksi metsäpalovaroitusjärjestelmällä tiedotetaan suurelle yleisölle ja paloviranomaisille maaston kuivuuden aiheuttamasta metsäpalovaarasta, jonka arviointi perustuu Ilmatieteen laitoksen säähavaintojen ja -ennusteiden sekä maaston paloherkkyyttä arvioivien tietojen yhdistämiseen. ICT paitsi auttaa näiden lähtötietojen saamisessa (sääasemat, satelliittihavainnot) ja tarkempien mallien laatimisessa kuin niiden tulosten tehokkaassa viestimisessäkin.

Mobiilisovelluksiin perustuvat järjestelmät riskeistä varoittamiseen ja ohjeistamiseen ovat yksi ICT:n tuoma keino varautumiseen. Tämä edellyttää kuitenkin toimivia verkkoja ja ihmisten käytössä olevia laitteita, mikä ei ole maailmanlaajuisesti itsestään selvä. Erilaisia mobiiliviestintäverkkojen ja mobiilien säähavaintoasemien järjestelmiä on kehitetty näihin haasteisiin vastaamiseksi.²⁸⁵

²⁸⁴ <https://www.bbc.com/news/science-environment-52543589>

²⁸⁵ <https://www.wri.org/our-work/project/world-resources-report/icts-key-technology-help-countries-adapt-effects-climate>

Välittömiin henkeä uhkaaviin riskeihin varautumisen lisäksi ICT tuottaa hiukan pidemmän aikavälin ratkaisuja esimerkiksi maatalouden sopeutumiseen. Esimerkiksi kastelua voidaan suunnitella maaperän tilaa seuraamalla. Maataloudelle ja muille yhteiskunnan toiminnoille välttämättömien makean veden varantojen tilaa voidaan seurata paikannukseen perustuvilla ICT-sovelluksilla.

8.2.2. ICT ja ympäristöntutkimus

ICT:n hyödyt ympäristöntutkimuksessa ja ilmastotieteessä ovat ilmeiset, niin kuin muillakin tieteenaloilla. ICT:n hyödyntäminen ulottuu havaintojen keruusta, datan säilytyksestä ja käsittelystä sekä mallien tuottamisesta datan jakamiseen sekä viestimiseen suurelle yleisölle. Tietoon perustuva päätöksenteko tarvitsee taakseen parasta mahdollista, luotettavaa tietoa, mikä voidaan varmistaa avoimuuden ja vertaisarvioinnin kautta.²⁸⁶

ICT tehostaa tutkimushavaintojen keruuta esimerkiksi automatisoiduilla mittausasemilla, joilla voidaan mitata ja seurata esimerkiksi ilman tai veden lämpötilaa tai eri aineiden ml. saasteiden pitoisuuksia niissä. Kansalaishavainnoilla voidaan täydentää tutkimusta hyödyttäviä tietoja. ICT ja erilaiset varta vasten kehitetyt applikaatiot, kuten Suomen ympäristökeskuksen Järvi-meriwikiin havaintolähetti tukee tällaisten havaintojen lähettämistä, tallentamista ja prosessointia. Tietomassojen helpompi säilytys, erilaiset hakutoiminnot ja parantuneen laskentatehon avulla parantunut mallinnus ovat myös esimerkkejä ICT:n hyödyistä tutkimusprosessin eri vaiheissa. Datan visualisointi ja viestimiskanavat suurelle yleisölle ovat myös huomattavasti parantuneet ICT:n myötä.

Kehittyneet ICT-ratkaisut ja luonnon monimuotoisuuden kuvaaminen digitaalisesti vaikuttavalla tavalla mahdollistaa myös uudenlaisen ympäristöviestinnän. Tämä saattaa vaikuttaa tietoisuuden lisääntymisen kautta ihmisten kulutuskäyttäytymiseen ja tätä kautta heijastua ympäristön- ja ilmastomuutokseen. Yhden tutkimuksen mukaan 88 % henkilöistä, jotka katsoivat *Blue Planet 2* -sarjan jakson muovista muuttivat kulutuskäyttäytymistään kestävämmäksi.²⁸⁷ Sarjan tekemisessä käytettiin laaja-alaisesti drooneja.

8.2.3. Esimerkkejä ICT:stä luonnon monimuotoisuuden tutkimisessa ja suojelussa

Tässä raportissa on tarkasteltu erityisesti ICT-alan hyötyjä ilmastomuutoksen hidastamisessa sekä ICT-alan omia ilmastomuutokseen vaikuttavia päästöjä. Luonnon monimuotoisuuden hupeneminen on merkitykseltään ilmastomuutokseen rinnastuva vakava ihmiskunnan hyvinvointia uhkaava kehityskulku. Alla nostetaan muutamia esimerkkejä ICT:n hyödyistä luonnon monimuotoisuuden tutkimisessa ja suojelussa.

²⁸⁶ Tarvetta parantaa julkisen tiedon saatavuutta tukee EU:n direktiivi 2019/1024 avoimesta datasta ja julkisen sektorin tietojen uudelleenkäytöstä.

²⁸⁷ Waitrose food and drink report 2018-2019.

Nämä esimerkit ovat vain pieni raapaisu kokonaisuudesta, mutta osaltaan havainnollistavat ICT:n läpileikkaavaa merkitystä.

Elinympäristöjä, niiden katoamista tai suojelun onnistumista, kuten yksittäisiä lajien esiintymiäkin voidaan kartoittaa ja seurata kaukokartoitusmenetelmin. ICT:n myötä kehittyneet datojen analysointimenetelmät hyödyttävät myös biodiversiteettiä koskevan datan käsittelyä. Satelliittihavaintoja, DNA-sekvensointia ja kehittynyttä ekologista mallinnusta yhdistelemällä voidaan syventää yhdellä havaintomenetelmällä saatuja tietoja.²⁸⁸

Vaikeasti kartoitettavissa olevan lajiston, kuten Brasilian sademetsien lintujen sekä sienten ja lintulajien kartoituksissa on edistytty viime vuosina ääninäytteiden pohjalta ja osin automatisoituja laitteita hyödyntämällä. Ekosysteemien toiminnan ymmärtämisen kannalta lajiston tunteminen on avainasemassa, mutta vielä kuvaamattomia lajeja (jopa 80 % maapallon eliölajeista) on niin paljon, ettei niitä ehdittäisi koskaan löytää perinteisin menetelmin. Helsingin yliopiston vetämässä kansainvälisessä Lifeplan-hankkeessa puoliautomatisoituja näytteenottimia hyödyntäen kerätään maailmanlaajuisia biodiversiteettidataa ja mallinnetaan sen perusteella tulevaisuutta.

Lajistoa ja sen monimuotoisuutta koskevan datan säilyttämisen, käyttämisen ja jakamisen kannalta tärkeässä osassa ovat luonnontieteelliset museot. Kokoelmien digitointi palvelee niin tutkimusta ja seurantaa, harrastajia kuin suurta yleisöä. Kansainvälisesti datan saavutettavuutta, ja käytettävyyttä parannetaan erilaisilla museoiden välisillä yhteishankkeilla ja sopimuksilla.

ICT:n avulla tehostuneen tutkimustuloksista viestimisen ja museoiden kokoelmien jakamisen lisäksi, tietoa monimuotoisuudesta ja ihmisten kiinnostusta sen säilyttämiseen voidaan lisätä erilaisten ICT-sovelluksien avulla. Viime vuosina suurta suosiota ovat saaneet eri järjestöjen ja yhdistysten webkamerat, joilla voidaan lajeja häiritsemättä seurata esimerkiksi saimaannorpan auringonottoa rantakalliolla tai harvinaisen petolinun pesinnän onnistumista. Tarjolla on myös käytettäviä sovelluksia, jotka tekoälyä hyödyntämällä auttavat luotettavasti harrastajien lajientunnistamista ja joilla voidaan myös kerätä kansalaishavaintoja tutkimusta varten.²⁸⁹

²⁸⁸ <https://www.nature.com/articles/s41559-017-0176?proof=true>

²⁸⁹ www.inaturalist.com

9. Case-esimerkit ICT:stä kasvihuonekaasupäästö- vähennysten mahdollistajana

Seuraavassa tarkastellaan syvällisemmin kahta laajaa käyttötapausta, jossa ICT-ratkaisuja tehokkaasti hyödyntämällä voidaan tuottaa positiivisia ilmasto- ja ympäristövai-
kutuksia.

9.1. Logistiikka

Lähes 90 % Suomen kotimaan tavaraliikenteen tonnimääristä kuljetetaan tieliiken-
teessä. Vertailtaessa liikennemuotojen osuutta kuljetussuoritteesta (rahtitonnin kuljetta-
minen kilometrin matkan, tkm) erot hieman tasoittuvat, mutta tieliikenteen osuus kulje-
tussuoritteesta on silti noin 65 %, kun taas rautatieliikenteen on noin 28 % ja vesiliiken-
teen 7 %.²⁹⁰ Ulkomaankaupan viennistä ja tuonnista valtaosa kulkee meritse.²⁹¹ Vuonna
2018 kuorma-autoliikenteen liikennesuorite oli 1,9 miljardia kilometriä²⁹² kuormausas-
teen ollessa 71 %.²⁹³ Tämä liikennesuorite pitää sisällään muun muassa tyhjien konttien,
kuormalavojen ja rullakoiden kuljetukset, mutta ei tyhjänä ajoa. Kun huomioidaan tyh-
jänä ajo sekä tyhjien konttien ym. kuljetus, käyttöaste hyödykkeiden kuljettamisessa on
Suomessa noin 57 %.

Tavarakuljetusten määrä riippuu kulutukseen menevien hyödykkeiden määrästä. Vuo-
desta 2014 lähtien kuljetussuorite Suomessa on kasvanut, mutta teollisuuden tuotanto-
rakenteen muutosten on arvioitu kääntävän kasvun hienoiseksi laskuksi vuoden 2040
jälkeen. Kotimaisen tieliikenteen osuus arvioissa kuitenkin pysyy korkealla.²⁹⁴

Suomen kaikista kasvihuonepäästöistä kotimaan liikenteen osuus on noin viidennes
(11,4 miljoonaa tonnia vuonna 2017), ja tästä viidenneksestä tieliikenteen osuus on 95
%. Paketti- ja kuorma-autojen osuus tieliikenteen päästöistä on noin 40 %, joka on puo-
lestaan noin 10 % koko Suomen kasvihuonepäästöistä. Postin teettämän selvityksen
mukaan suhteellisen suuri osuus kuljetusten päästöistä tulee ns. viimeisen kilometrin

²⁹⁰ <http://liikennejarjestelma.fi/palvelutaso/liikennetyypit/kotimaan-tavaraliikenne/>

²⁹¹ <http://liikennejarjestelma.fi/palvelutaso/liikennetyypit/ulkomaan-tavaraliikenne/>

²⁹² https://www.stat.fi/til/kttav/2018/kttav_2018_2019-04-16_tie_001_fi.html

²⁹³ [http://liikennejarjestelma.fi/palvelutaso/matkojen-ja-kuljetusten-palvelutaso/tiekulje-
tusten-kustannustehokkuus/](http://liikennejarjestelma.fi/palvelutaso/matkojen-ja-kuljetusten-palvelutaso/tiekulje-
tusten-kustannustehokkuus/)

²⁹⁴ Lapp ym. 2018: Valtakunnalliset liikenne-ennusteet - Liikenneviraston tutkimuksia ja
selvityksiä.

toimituksista (last mile). Toimitusten viimeisen kilometrin päästöihin vaikuttavat eniten jakelutehokkuus mutta myös ajoneuvotyyppi ja toimitusetäisyys.²⁹⁵

Liikenteen kasvihuonepäästöjen perusennusteen mukaan liikenteen kasvihuonekaasupäästöt tippuvat vuoteen 2030 mennessä noin 37 prosenttiin vuoden 2005 tasosta. Perusennusteen taustalla ovat jo tehtyjen päätösten vaikutus todennäköiseen toimintaympäristömuutokseen, muun muassa päätökset biopolttoaineiden osuuden nostamisesta sekä uusien henkilö- ja pakettiautojen sekä raskaiden ajoneuvojen CO₂-raja-arvojen alentaminen.²⁹⁶

Logistiikan suorat päästöt riippuvat pääosin ajosuoritteesta, minkä takia käyttövoiman CO₂-sisällöllä on suurin merkitys päästöihin. Käyttövoiman CO₂-sisältöä voi laskea biokomponenttien osuutta nostamalla ja sähkön käyttöä lisäämällä. Sähkön odotetaan yleistyvän käyttövoimana kuljetuskalustossakin.²⁹⁷ Myös kuljetuskaluston kehittyminen ja niiden energiatehokkuuden kasvaminen vähentävät päästöjä. Esimerkiksi vuonna 2019 ajoneuvoyhdistelmien suurinta sallittua pituutta nostettiin²⁹⁸, minkä on arvioitu vähentävän ajoneuvosuoritetta 120 miljoonalla kilometrillä ja CO₂-päästöjä 66 miljoonalla kilolla sekä tuovan 5–15 % säästöä polttoainekustannuksissa.²⁹⁹

Myös digitalisaatiolla on vaikutusta kuljetuskalustoon ja päästöjen kehittymiseen. Ajoneuvovalmistajat ovat muun muassa kehittäneet autonomisia kuorma-autoja, joiden käytännön sovellutuksena pidetään letka-ajoa. Yksi alan suurista yrityksistä on kuitenkin ilmoittanut lopettavansa letka-ajon kehityksen ja panostavansa autonomisten autojen kehitystyöhön, sillä letka-ajon hyödyt, muun muassa ilmanvastuksen pieneneminen ja polttoainekustannuksien säästöt, jäivät odotettua alhaisemmiksi ihanteellisissakin olosuhteissa.³⁰⁰ Letka-ajon ja tavaraliikenteen automatisaation ei uskota vaikuttavan merkittävästi tieliikenteen määrään, mutta ne voivat johtaa kuljetusten keskittymiseen runkoyhteyksille.³⁰¹ Letka-ajoa ja muita digitalisaation mahdollistamia älykkään liikenteen ratkaisuja on esitelty luvussa 8.1.2.

Digitalisaation vaikutukset logistiikkaan kohdistuvat yhtäältä suoraan logistiikan toteutukseen, prosesseihin ja niiden hallintaan, toisaalta välillisesti erilaisten muutostrendien kautta. Logistiikan keskiössä ovat tiedonhallinta ja -kulku koko toimitusketjussa, ja logistiikka-alalla tietomäärien on ennakoitu kasvavan tulevaisuudessa räjähdysmäisesti. Tiedonkulku turvaa ja mahdollistaa muun muassa paketin seurannan toimitusketjussa ja toimitukset oikeaan aikaan oikeaan paikkaan. Koneluettava ja koneellisesti käsiteltävä tieto ovat pohjana automaatioteknologialle, ja logistiikassa pyritäänkin yhä enem-

²⁹⁵ https://www.posti.fi/business-news/tiedotteet/2019/20190605_verkkokauppa_selvitys.html

²⁹⁶ VTT: Liikenteen kasvihuonepäästöjen perusennuste 2020-2050.

²⁹⁷ Sirkiä 2018: Etelä-Suomen hajautetun logistiikkajärjestelmän visio 2030, Uudenmaan liiton julkaisuja C 89.

²⁹⁸ <https://www.lvm.fi/-/ajoneuvoyhdistelmien-enimmaispiteudeksi-34-5-metria-995196>

²⁹⁹ Still 2019: Ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muutos - Aiempaa pidemmän ja uudentyypiset ajoneuvoyhdistelmät.

³⁰⁰ <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Daimler-Trucks-invests-half-a-billion-Euros-in-highly-automated-trucks.xhtml?oid=42188247>

³⁰¹ Lapp ym 2018: Valtakunnalliset liikenne-ennusteet - Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 57/20187.

män automatisoituun digitaaliseen tiedonvälitykseen, jossa eri tietojärjestelmät keskustelevat suoraan keskenään. Tähän osa-alueeseen kohdentuu merkittävä osa digitalisaation kehityksestä, kuten sähköiset kuljetustilausjärjestelmät. Digitalisaation sovelluksilla ja datataloudella, jossa liiketoimintamalli perustuu tiedon hyödyntämiseen ja käyttöön, on tunnistettu merkittäviä hyötyjä logistiikassa pitkällä aikavälillä.

Tiedon ja datatalouden merkitys näkyy hyvin esimerkiksi logistiikan solmukohdissa. Satamat, terminaalit ja varastot ovat keskeisiä logistiikkaketjujen solmukohtia, joissa tavaratoimitukset tai kuljetusyksiköt vaihtavat kuljetusmuotoa ja ajoneuvoa. Usein solmukohdissa toimii lukuisia eri toimijoita ja yrityksiä, ja esimerkiksi satamissa tiedonvirtaus toimijoiden välillä ja tiedon siiloutuminen ovat tunnistettuja haasteita. Digitaaliset alustat parantavat tiedon reaaliaikaista näkyvyyttä ja yhdistettävyyttä sekä edelleen parantavat lastinkäsittelyn tehokkuutta ja tuottavuutta, mikä säästää aikaa logistiikan solmukohdissa ja parantaa kuljetuskaluston käyttö- ja täyttöasteita. Esimerkiksi Oulun sataman tavoitteena on optimoida ja kehittää satama-alueen toimintaa sekä liikenne- ja tavaravirtoja hyödyntämällä päätöksenteossa tarkkaa ja ajantasaista tietoa³⁰². Oulun satama-alueella dataa kerätään eri lähteistä, analysoidaan sekä tuodaan alueen toimijoiden ja rahdinomistajien hyödynnettäväksi. Tämän taustalla on yhtenä pyrkimyksenä mahdollistaa satama-alueen ympäristö- ja ilmastovaikutusten analysointi ja toiminnan muuttaminen kestävämmäksi.

Merkittävimmit digitalisaation hyödyt saadaan todennäköisesti toimitusketjun kokonaisvaltaisesta tehostumisesta. Yhtenä esimerkkinä digitalisaation hyödyistä on VTT:n ja johtavan metsäalan yrityksen pitkäjänteinen yhteistyö puunkuljetusten tehostamiseksi. Kyseessä on koko raakapuun kuljetusketjun optimointi kannolta tehtaalte. Tehtävä on monioptimointiongelmaksi, jossa ICT:n rooli on kriittinen: tarvitaan IoT-antureiden tuottamaa tietoa metsäkoneilta, satelliittipaikannuksen tuottamaa tietoa puupienojen ja rekkien sijainnista, tavarajunien ja rataverkon tilannetiedot, tietoliikenneyhteyksiä ja vaativaa optimointilaskentaa palvelimilla. Tuloksena metsäyhtiö pystyi vähentämään kuljetuskustannuksia ja samalla päästöjä 5 %. Kyseisen yrityksen puunhankinta vuosittain on 21 miljoonaa kuutiota.

Vaikka logistiikka ja kuljettaminen ovat vaihteittain automatisoitumassa, on aikataulu monien teknologisten ratkaisujen käyttöönotolle ja yleistymiselle vielä avoin. On arvioitu, että lähitulevaisuuden konkreettiset muutokset logistiikan suoritteisiin ja toteutuksiin jäävät todennäköisesti suhteellisen pieniksi.³⁰³ Esimerkiksi satamien automatisointi on digitalisaation avulla mahdollista, mutta pienillä tavaravirroilla automatisoinnin investointikustannukset nousevat helposti korkeiksi. Suomessa tavaraliikenteen volyymit ovat kansainvälisesti vertailtuna pieniä ja hajanaisia, mikä onkin hidastanut automaation ja digitalisaation käyttöönottoa. Viimevuosina varastoautomaation ja erilaisten digitaalisten ohjelmistojen käyttöönotto sekä rajapintojen avaaminen ovat kuitenkin edenneet.

Kuljetusten yhdistäminen ja siten käyttöasteen nostaminen on yksi esimerkki digitalisaation mahdollisuuksista. Tyhjänä ajon määrä on kuitenkin pysynyt samalla tasolla mahdollisuuksista huolimatta. Yhtenä syynä on se, että tyhjänä ajo liittyy luontaisesti moniin toimialoihin, esimerkiksi metsäteollisuuden kuljetuksiin. On epätodennäköistä,

³⁰² <https://ouluport.com/satamadigitalisaatio-port-oulu-smarter/>

³⁰³ Pöyskö ym. 2016: Automaatio ja digitalisaatio logistiikassa. Kehitysnäkymiä Suomessa ja maailmalla, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä.

että tyhjänä ajon määrä pienentyisi voimakkaasti vuoteen 2030 mennessä digitalisaation seurauksena.³⁰⁴ Kynnys käyttää sähköisiä alustoja kuljetusten yhdistelyssä saat-
taa kuitenkin madaltua, mikäli alustat saadaan sulautettua luonnolliseksi osaksi muita
kuljetusliikkeiden järjestelmiä. Alalla otetaan todennäköisimmin uudet innovaatiot käyt-
töön, jos uudet toiminnallisuudet ovat saumattomasti yhteen kytketty olemassa oleviin
järjestelmiin ja niiden hyödyt on selkeästi tunnistettavissa.

9.1.1. Digitalisaation päästövähennysvaikutukset eri skenaarioissa ja muutostrendeissä

Ramboll Oy on liikenne- ja viestintäministeriön tilauksesta laskenut digitalisaation vai-
kutuksia logistiikka-alan päästöihin. Logistiikkaan vaikuttavia muutostrendejä ovat
sääntelyn ja teknologian muutokset; kaupungistuminen; globalisaatio ja yksikkölii-
kenne; kiertotalous ja palveluvaltaistuminen; sekä kaupan rakennemuutos. Näiden tun-
nistettujen muutostrendien lisäksi logistiikan digitalisaation kehitykseen voivat merkittä-
västi yllättävät ja nopeat tapahtumat. Esimerkiksi vuoden 2020 koronaviruspandemia
on lisännyt painetta kehittää digitaalista liiketoimintaa ja verkkokauppaa lähes kaikilla
aloilla.

Logistiikan digitalisaatio näkyy muun muassa kuljetusvälineistä kerättävänä datana;
sähköisinä asiakirjoina; sähköisinä tietoympäristöinä; logistiikan automatisaationa; re-
aaliaikaisena tilannekuvana; sekä reittitietoina. Niin muutostrendit kuin logistiikan digi-
talisaaion ilmentymät yhdessä vaikuttavat logistiikka-alan kokonaispäästöihin. Päästö-
jen indikaattoreita logistiikassa ovat keskikulutus, keskikuorma, keskimatka, kuljetus-
muotojaksuma, polttoaineen CO₂-sisältö ja tyhjänä ajo.

Digitalisaation vaikutuksista logistiikan suoritteisiin ja edelleen päästöihin on saatavilla
heikosti tutkimustietoa ja tuloksia, mikä tuo digitalisaation päästövaikutusten lasken-
taan epävarmuutta. Ramboll on arvioinut digitalisaation päästövähennysvaikutuksia lo-
gistiikassa edellä mainittujen muutostrendien ja digitalisaation ilmentymien osalta kol-
messa skenaariossa, ja tarkastelut on jaettu kahteen ajanjaksoon 2018–2030 ja 2030–
2045. Perusskenaariossa on oletettu, että päästömuutosten kehitystrendi on sama
kummallakin ajanjaksolla, lukuun ottamatta biopolttoaineiden osuutta, jonka arvioidaan
nousevan vuoden 2018 10,5 prosentista 43,5 prosenttiin 2030 mennessä ja 45 pro-
senttiin 2045 mennessä.

Perusskenaario on todennäköisin skenaario kuljetuksien päästöjen kehityksestä. Toi-
sessa skenaariossa biopolttoaineiden osuus pysyy samana kuin ensimmäisessä ske-
naariossa, mutta digitalisaation kehitys on jatkunut odotettua nopeampana. Digitalisaa-
tion hyötyjä on kohdennettu kuljetuksien yhdistelylle, ajotapamuutoksiin, moottoritek-
niikkaan ja kuljetusten optimointiin, mutta samalla digitalisaatio on lisännyt kasvaneen
verkkokaupan myötä kuljetusmääriä ja päästöjä. Kolmas skenaario eroaa perusske-
naariosta siinä, että vaihtoehtoisten käyttövoimien osuus kasvaa hieman odotettua
suuremmaksi. Biokomponenttien osuus myydystä dieselistä on tässä skenaariossa 48
% vuoteen 2030 mennessä ja 54 % vuoteen 2045 mennessä. Sähkön osuus jakeluli-
kenteen käyttövoimasta on kaksinkertainen verrattuna perusskenaarioon. Suurimmat

³⁰⁴ Liimatainen ja Viri 2017: Liikenteen päästötavoitteiden saavuttaminen 2030 - poli-
tiikkatoimenpiteiden tarkastelu. Suomen ilmastopaneeli.

päästövähennykset ovat kaikissa kolmessa skenaariossa saavutettavissa vuosina 2018–2030, kun vuosina 2030–2045 päästövähennysvaikutukset arvioiden mukaan pienenevät.

Sääntely ja teknologian muutos

Useammassa selvityksessä^{305,306} sääntely on nähty lähes ainoana keinona vähentää kasvihuonepäästöjä muun muassa sen takia, että kustannustehokkuus priorisoidaan helposti päästövähennysten edelle. Eri toimijat lähestyvät digitalisaatiota omista lähtökohdistaan ja hyötynäkökulmistaan, ja sääntelyn avulla voidaan edistää digitalisaation tarjoamien ratkaisujen ja sovellusten hyödyntämistä ja käyttöönottoa toimialalla. Esimerkiksi merenkulun osalta on todettu, että standardoinnilla ja yhteisten ohjelmointirajapintojen luomisella voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä.³⁰⁷ Sääntelyn suurimmat vaikutukset päästövähennyksiin on arvioitu käyttövoiman CO₂-sisällön vähentämisestä. Lisäksi sääntely voi ohjata moottori- ja ajoneuvoteknologian kehittymistä. Myös digitalisaation työkalut logistiikassa voivat mahdollistaa joitain sääntelyn vaikutuksia. Esimerkiksi datan keräys ja automatiikka mahdollistavat muutokset ajotavassa ja keskikulutuksen seurannassa, kun taas reittioptimoinnin osalta tietoa voidaan rikastaa muun muassa reaaliaikaisella liikennetilanteella.

Digitalisaation osuus sääntelyn ja teknologian muutoksen muutostrendin vaikutuksesta logistiikan kokonaispäästöihin on marginaalinen. Tämän muutostrendin arvioidaan kokonaisuutena tuovan kuitenkin suurimmat päästövähennykset logistiikassa kaikissa kolmessa skenaariossa, ja suurin päästövähennyspotentiaali tällä muutostrendillä on skenaariossa 3. Skenaariossa 3 sääntelyn ja teknologian muutosten arvioidaan vuosina 2018–2030 vähentävän päästöjä 2,12 megatonnia vuodessa, josta digitalisaation osuus on 0,03 Mt/a, ja vuosina 2030–2045 0,35 Mt/a, josta digitalisaation osuus on 0,01 Mt/a. Skenaarion 2 vastaavat luvut 2018–30 ovat 1,84 Mt/a ja 0,07 Mt/a, ja vuosina 2030–45 0,27 Mt/a ja 0,04 Mt/a. Perusskenaariossa päästövähennyspotentiaali sääntelyn ja teknologian muutoksen osalta on kaikista skenaarioista pienin: 2018–30 päästöjen arvioidaan vähenevän 1,80 Mt/a, josta digitalisaation osuus on 0,03 Mt/a, ja 2030–45 vastaavat luvut ovat 0,25 Mt/a ja 0,02 Mt/a.

Kaupungistuminen

Kaupungistumisen arvioidaan vähentävän kohtuullisesti logistiikan päästöjä. Syynä tälle on se, että esimerkiksi verkkokaupan asiakkaat keskittyvät, mikä vähentää toimittajien keskimatkaa ja nostavat keskiuormaa. Myös kierrätystuotteiden keräys aiheuttaa päästöjä tällöin vähemmän. Valtaosa päästövähennyksistä tulee siis kaupunkirakenteesta, eli lyhyemmistä matkoista ja pienemmästä kalustosta. Logistiikan digitalisaation sovellukset, kuten älykkäät reittitiedot, voivat tarjota mahdollisuuksia päästövähennyksiin. Esimerkiksi UPS on kehittänyt omaa reittioptimointisovellustaan ja raportoinut merkittäviä säästöjä polttoainekustannuksissa.³⁰⁸ Älykkäät reittitiedot voivat myös

³⁰⁵ Sirkiä ym. 2018: Etelä-Suomen hajautetun logistiikkajärjestelmän visio 2030, Uudenmaan liiton julkaisu C 89.

³⁰⁶ Solakivi ym. 2018: Logistiikkaselvitys 2018, Turun kauppakorkeakoulu.

³⁰⁷ Rantanen ym. 2019: Digitalisaation hyödyntäminen merenkulun päätösvähennyksissä. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom.

³⁰⁸ UPS 2020: Orion Backgrounder.

mahdollistaa kevyiden kuljetusvälineiden kaupallisen käytön kaupungeissa sekä opastaa kiinteistöissä aina oikealle ovelle ja jopa kiinteistöjen sisälle.

Logistiikan digitalisaation vaikutukset päästöihin kaupungistumisen osalta ovat suuremmat kuin muissa muutostrendeissä, mutta silti marginaaliset. Muutostrendinä kaupungistuminen tuo kaikkien skenaarioiden osalta toiseksi suurimman päästövähennyspotentiaalin. Suurimmat päästövähennykset kaupungistuminen tuo skenaariossa 2, jossa vuosina 2018–30 sen arvioidaan vähentävän päästöjä 0,14 Mt/a, josta digitalisaation osuus on 0,07 Mt/a, ja 2030–45 0,07 Mt/a, josta digitalisaation osuus on 0,04 Mt/a. Skenaariossa 1 kaupungistuminen voi mahdollistaa 0,10 Mt/a päästövähennyksen vuosina 2018–30, kun digitalisaation osuus vähennyksistä on 0,04 Mt/a, ja 0,06 Mt/a vuosina 2030–45 digitalisaation osuuden ollessa 0,02 Mt/a. Skenaariossa 3 kaupungistumisen päästövähennyspotentiaalin arvioidaan olevan vuosina 2018–30 samalla tasolla kuin skenaariossa 1, mutta vuosina 2030–45 päästövähennyspotentiaali on 0,05 Mt/a, josta digitalisaation osuus on 0,02 Mt/a.

Globalisaatio

Globalisaation lisääntymisen myötä yritysten liiketoiminta on yhä enenevässä määrin ylikansallista, ja tuotteiden valmistus ja markkinat voivat olla eri mantereilla. Yksikköliikenteellä tarkoitetaan tavaroiden kuljettamista kuormattuna yksiköihin, kuten kontteihin, vaihtokoreihin sekä puoliperävaunuihin. Kuljetusyksiköt ovatkin monen kuljetusjärjestelmän perusta ja esimerkiksi jo 1960-luvusta asti käytössä olleet konttikuljetukset perustuvat standardoituihin kuljetusyksiköihin. Globalisaation ja yksikköliikenteen muutostrendin myötä tiekuljetusten keskimatkan arvioidaan kasvavan, sillä toimitukset kulkevat määränpäähän sataman kautta eivätkä kotimaisista tuotantolaitoksista. Samalla toimitusmäärät ovat suurempia, mikä hieman kasvattaa ajokalustoa ja siten myös keskikulutusta. Suuremman kuljetuskapasiteetin arvellaan kuitenkin kasvattavan keski-kuormaa. Myös logistiikan digitalisaation sovelluksilla voidaan kasvattaa keski-kuormaa. Rahtikirjatiedon sähköistyminen auttaa kapasiteetin arviointia ja kuormausasteen optimointia. Sähköisten rahtikirjojen laajamittainen ja yhdenmukainen käyttö voi parantaa kuormausastetta. Myös lohkokejuteknologia ja sähköiset tietoympäristöt voivat vaikuttaa logistiikka-alan tehokkuuteen, vaikka kulutettuun polttoaineeseen vaikutus ei todennäköisesti merkittävä olekaan. Kaikkien kolmen skenaarion osalta arvioidaan, että digitalisaation avulla pystytään mahdollisesti kompensoimaan globalisaation ja yksikköliikenteen muutostrendin muuten kasvattamia päästöjä.

Kiertotalous ja palveluvaltaistuminen

Kiertotaloudessa arvontuotanto tapahtuu aineettomasti, tuotteet korvautuvat palveluilla ja raaka-aineet ja materiaalit pysyvät talouden käytössä. Kiertotalous on riippuvainen digitalisaation tuomista hyödyistä.³⁰⁹ Koska materiaalit päätyvät kiertotaloudessa uudelleen käytettäviksi, kohtaavat logistiset järjestelmät uusia haasteita, kuten tavaravirtojen heikkomman ennakoitavuuden ja pienet kuljetusmäärät. Kiertotalouden edellytyksenä onkin digitalisaation mahdollistama toimitusketjujen tehokas hallinta, sillä tuotteiden

³⁰⁹ <https://ek.fi/syty-kiertotaloudesta/mika-ihmeen-kiertotalous>

den vuokraamisen ja lainaamisen yleistyessä yhtä tuotetta saatetaan sen käyttöiän aikana kuljettaa yhä enemmän.³¹⁰ Kulutuksen arvioidaan tulevaisuudessa enenevässä määrin omistamisen sijasta palveluiden käyttämiseen ja vuokraamiseen.³¹¹

Kiertotalouden ja palveluvaltaistumisen arvioidaan lisäävän logistiikan päästöjä maltillisesti. Kierrätysvirtojen yleistymisen ja kasvaminen voivat kasvattaa keskimatkoja ja kuljetusmääriä sekä johtaa kierrätystuotteiden kuljettamiseen yhä isommilla ajoneuvoilla, mikä kasvattaa keskikulutusta. Toisaalta kierrätysvirrat voivat lisääntyvien paluukuljetusten myötä nostaa hieman kuormausastetta ja vähentää tyhjänä ajoa. Arvioidaan, että logistiikan digitalisaation sovelluksilla voidaan kompensoida hieman kiertotalouden ja palveluvaltaistumisen kasvattamia logistiikan päästöjä, mutta ei täysin. Kiertotalous ja palveluvaltaistuminen kasvattavat kaikissa skenaariossa logistiikan päästöjä 0,01 Mt/a. Digitalisaation vaikutus näihin päästöihin on vähäinen eikä se olennaisesti vähennä päästöjen määrää.

Kaupan rakennemuutos

Suomen päivittäistavaramarkkinoilla on ollut jo pitkään trendinä, että myynti keskittyy isoihin myymälöihin. Kansainvälinen ja kotimainen kilpailu ajavat kaupan alallakin toimintojen tehostamiseen digitalisaation ja automatisaation avulla, ja erityisesti suurilla yritysillä on resursseja tähän.³¹² Kuluttajakäyttäytymisen osalta näkyvimpiä muutoksia on ollut verkkokaupan kasvu. Nettiokaupan kasvun myötä tavarat kuljetetaan suoraan varastosta pääosin ilman välivarastoja asiakkaille. Suomessa Posti on arvioinut, että ulkoistetun logistiikan markkinat tulevat kasvamaan noin 20 prosentin vuosivauhtia, minkä taustalla ovat erityisesti kaupan rakennemuutos ja palveluiden kasvava kysyntä.³¹³

Kokonaisuudessaan kaupan rakennemuutoksen arvioidaan kasvattavan logistiikan päästöjä. Verkkokaupan kasvun arvioidaan johtavan kuljetuksien keskimatkan pidentymiseen, kun asiakkaat eivät nouda tuotteita myymälöistä, ja samalla keskikuorma laskee, kun toimituksia viedään useampaan osoitteeseen. Toisaalta jakelu voidaan tehdä pienemmällä kalustolla, jolloin keskikulutus pienenee. Logistiikan digitalisaation sovellusten arvioidaan pienentävän kaupan rakennemuutosten aiheuttamia logistiikan päästöjä. Digitalisaatio ja automatisaatio mahdollistavat esimerkiksi pakettiautomaattien ja jakohuoneiden yleistymisen, minkä arvioidaan kasvattavan keskikuormaa. Älykkäät ja ennakoivat tilausjärjestelmät puolestaan voivat vaikuttaa kaupan kuljetuksien määrään ja käytettävän kaluston optimointiin vähentäen tyhjänä ajoa ja kasvattaen keskikuormaa. Muun muassa Relex-tilausjärjestelmän asiakkaat ovat raportoineet merkittäviä päästövähennyksiä toimitusketjuissaan.³¹⁴ Älykkäät tietojärjestelmät vaikuttavat myös esimerkiksi toimituskertojen määrään.

³¹⁰ <https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/logistics-challenging-circular-economy>

³¹¹ <https://www.sitra.fi/artikkelit/mita-nama-kasitteet-tarkoittavat>

³¹² <https://kauppa.fi/uutishuone/2019/08/05/vahittaiskauppa-nyt-suhdannehuipussa-tulevaisuuden-uhkana-yrityskato>

³¹³ https://www.posti.fi/private-news/tiedotteet/2019/20190125_posti_transval.html

³¹⁴ <https://www.relexsolutions.com/news/bunting-group-and-relex-win-partnership-of-the-year-at-retail-systems-awards>

Logistiikan digitalisaation ratkaisut eivät täysin pysty kompensoimaan kaupan rakennemuutoksen aiheuttamia päästöjä. Sekä skenaariossa 1 että 3 kaupan rakennemuutoksen arvioidaan kasvattavan logistiikan päästöjä erityisesti vuosina 2018–30 (kummassakin skenaariossa 0,12 Mt/a). Kaupan rakennemuutoksen aiheuttamien päästöjen määrän arvioidaan kummassakin skenaariossa lähtevän laskusuuntaan vuosina 2030–45, jolloin skenaariossa 1 kaupan rakennemuutos lisää logistiikka-alan päästöjä 0,07 Mt/a ja 3. skenaariossa 0,06 Mt/a. Kummassakin skenaariossa kummallakin ajanjaksolla digitalisaatio vähentää päästöjen määrää 0,01 Mt/a. Skenaariossa 2 kaupan rakennemuutoksen arvioidaan lisäävän logistiikan päästöjä vuosina 2018–30 0,11 Mt/a. Ilman digitalisaation vaikutusta päästöt kasvaisivat kuitenkin 0,20 Mt/a, eli digitalisaation arvioidaan skenaariossa 2 vähentävän logistiikan päästöjä 0,09 Mt/a. Skenaariossa 2 vuosina 2030–45 kaupan rakennemuutoksen arvioidaan vähentävän logistiikan päästöjä 0,04 Mt/a, josta digitalisaation vaikutus tähän on 0,04 Mt/a.

Digitalisaation osalta sähköisillä tietoympäristöillä arvioidaan olevan suurin vähennyspotentiaali logistiikan päästöihin. Suurimmillaan tämä vaikutus on skenaariossa 2, jossa sähköisten tietoympäristöjen arvioidaan vähentävän päästöjä 0,155 Mt/a vuosina 2018–30 ja 0,075 Mt/a 2030–45. Skenaariossa 1 vastaavat luvut ovat 0,043 Mt/a ja 0,025 Mt/a ja 3. skenaariossa 0,043 Mt/a ja 0,022 Mt/a. Logistiikan automatisaatiolla arvioidaan olevan toiseksi eniten päästöjen vähennyspotentiaalia, ja senkin osalta suurimmat vähennykset arvioidaan olevan skenaariossa 2. Skenaariossa 2 logistiikan automatisaation arvioidaan vähentävän päästöjä 0,074 Mt/a vuosina 2018–30 ja 0,043 Mt/a vuosina 2030–45. Skenaariossa 1 vastaavat luvut ovat 0,033 Mt/a ja 0,020 Mt/a ja 3. skenaariossa 0,029 Mt/a ja 0,009 Mt/a.

Datan keräyksen kuljetusvälineistä arvioidaan vähentävän päästöjä kaikissa skenaarioissa 0,011 Mt/a vuosina 2018–30 ja 0,006 Mt/a vuosina 2030–45. Sähköisten asiakirjojen ja reaaliaikaisen tilannekuvan vaikutukset päästöihin pysyvät samana kaikissa skenaariossa ja kummallakin ajanjaksolla. Sähköisten asiakirjojen päästövähennysten arvioidaan olevan 0,001 Mt/a ja reaaliaikaisen tilannekuvan lähellä 0 Mt/a. Älykkäiden reittitietojen arvioidaan vähentävän päästöjä skenaariossa 1 ja 2 0,003 Mt/a vuosina 2018–30 ja 0,002 Mt/a vuosina 2030–45. Skenaariossa 3 älykkäiden reittitietojen vähennyspotentiaalin arvioidaan olevan vuosina 2018–30 hieman suurempi, eli 0,008 Mt/a, mutta vuosina 2030–45 se on samalla tasolla skenaarioiden 1 ja 2 kanssa, eli 0,002 Mt/a.

9.1.2. Yhteenveto

Päästöjen kannalta merkittävimmät logistiikan digitalisaation keinot ovat niitä, joilla voi vaikuttaa suoraan kuljetusmääriin ja -suoritteisiin, eli sähköiset tietoympäristöt, logistiikan automatisaatio ja pienemmässä määrin datan kerääminen ja hyödyntäminen. Digitalisaation tärkein merkitys logistiikalle on sähköinen ennakkotieto, jota voi hyödyntää suunnittelussa ja kuormien yhdistelyssä. Älykäs tilaus, tiedon läpinäkyvyys sekä automaatio toimivat puolestaan ajotavan muutoksen ja jakelun keskittämisen apuna.

Logistiikan digitalisaatio mahdollistaa muutokset muun muassa keskipuormassa ja keskikulutuksessa, mutta päästövähennysten aikaansaamiseksi keskipuorman tulisi kasvaa niin paljon, että välttyään yhdeltä kokonaiselta ajoneuvokuljetukselta. On esimerkiksi tapauksia, joissa digitalisaation avulla on saavutettu useamman prosenttiyksikön päästövähennyksiä. Kokonaisuutena digitalisaation keinojen vaikuttavuus päästöjen

vähentämiseen logistiikka-alalla on kuitenkin suhteellisen pieni verrattuna muihin vaikutusmekanismeihin. Muista vaikutusmekanismeista merkittävimpiä ovat sääntelyn kautta vaikuttaminen käyttövoiman muutoksiin sekä kaupungistumisesta ja toimintojen keskittymisestä johtuvat suoritemuutokset.

9.2. Energia-ala

ICT:llä nähdään useita hyötyjä energia-alalla. Päästövaikutukset ovat useilta osin epä-suoria. Esimerkiksi sääriippuvaisen uusiutuvan energiantuotannon integrointi sähköjärjestelmään ja -markkinoille edellyttää digitaalisia ratkaisuja uusien tuotanto- ja kysyntäjoustoratkaisuiden sekä verkonhallinnan kehittämiseksi. Kokonaan uusia joustavuutta lisääviä ratkaisuja ja toimintamalleja kehitetään erityisesti kysyntäjousto- liit-tyen. Digitalisaatio mahdollistaa esimerkiksi kysynnän automatisoidun supistamisen sähkön hinnan ollessa korkea ja kulutuksen lisäämisen sähkön hinnan ollessa matala.

Kiinteistöjen energiankäytön hallinnan osalta voidaan erottaa käyttäytymisen muuttami- seen tähtäävät ICT-sovellukset sekä automaatiolla ja älykkäällä säädöllä saavutettavat hyödyt. Kiinteistöautomaatiojärjestelmät voivat hyödyntää itseoppimista, jonka avulla voidaan tehostaa energiankäyttöä. IEA (2018) on arvioinut, että rakennusten energian- kulutuksen älykkäällä säädöllä voisi saavuttaa noin 10 % (n. 65 PWh) energiansäästön vuonna 2040 referenssiskenaarioon verrattuna. Vanhemmissa tutkimuksissa on esi- tetty yli 20 % energiansäästöarvoja.^{315,316} Toisaalta joissakin arvioissa ICT-ratkaisujen avulla aikaansaavat energiansäästöt nähdään huomattavasti pienemmiksi.³¹⁷ Kasvi- huonekaasujen päästövähennyspotentiaali riippuu käytetyistä energialähteistä sekä sähkön ja lämmöntuotannon ominaispäästöistä.

ICT:n vaikutuksia energia-alalla globaalien kasvihuonekaasupäästöjen (KHK-päästöt) vähentämisessä on arvioitu eri selvityksissä. Esimerkiksi GeSi:n vuoden 2015 rapor- tissa esitetään, että älykkäillä energijärjestelmillä voitaisiin saavuttaa 1,8 Gt hiilidioksi- diekvivalentin globaali KHK-päästöjen vähennys vuoteen 2030 mennessä Business As Usual-skenaarioon verrattuna. Lisäksi energiantuotannon päästövähennyksille arvioi- daan 1,6 Gt hiilidioksidiekvivalentin lisäpäästövähennys olettaen, että älykkäillä järjes- telmillä saavutettaisiin 6,3 biljoonan MWh energiansäästö. Rakennusten ICT-sovelluk- silla GeSi arvioi puolestaan saavutettavan 5 biljoonan MWh:n energian säästön ja vas- taavasti 2 Gt hiilidioksidiekvivalentin päästövähennyspotentiaalin. Kyseisessä rapor- tissa metodologinen lähestymistapa jää kuitenkin avoimeksi, jolloin laskelmia on vaikea vertailla. Tuoreimmissa GeSi:n raporteissa (2020) päästövähennyspotentiaaleja käsi- tellään enemmän maa- ja tapauskohtaisesti ja globaaleja vaikutuksia laadullisesti.

GSMA (2018) tarkastelee globaaleja KHK-päästövähennyspotentiaaleja hieman toi- sesta näkökulmasta: vertailukohtana on silloinen tilanne eli vuosi 2018 ja vältetyt KHK-

³¹⁵ Euroopan komissio 2011: Commission staff working document impact assessment. Energy Efficiency Plan 2011.

³¹⁶ Laitner & Ehrhardt-Martinez 2009: Examining the scale of the behaviour energy effi- ciency continuum. American Council for an Energy-Efficient-Economy.

³¹⁷ Bastida ym. 2019: Exploring the role of ICT on household behavioural energy effi- ciency to mitigate global warming. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

päästöt ("avoided emissions"). Heidän mukaansa matkaviestinnän avulla saavutettaisiin noin 2,135 Gt hiilidioksidiekvivalentin päästövähennys, joka olisi jopa kymmenkertainen sektorin omiin KHK-päästöihin verrattuna (220 Mt hiilidioksidiekvivalenttia). GSMA arvioi, että 10 % päästövähennyspotentialista saavutetaan rakennussektorilla ja 7 % energiasektorilla.

Vertailukelpoista ja läpinäkyvästi laskettua dataa hyödyistä on niukasti. Erityisesti mitattuja arvioita ICT:n vaikutuksista kasvihuonekaasupäästövähennyksissä on saatavilla rajoitetusti. Suomessa on käynnissä useita ekosysteemi- ja pilot -hankkeita, joiden avulla saadaan mitattua informaatiota eri sovellusten energiansäästöstä ja voidaan arvioida myös KHK-päästövähennysvaikutuksia.

Kun arvioidaan ICT:llä saatavia hyötyjä energiankulutuksessa ja päästövähennyksissä, tarvitaan tietoa myös ICT-ratkaisun itsensä tuottamisesta aiheutuvista päästöistä. VTT on arvioinut tätä muutamien esimerkitapauksien osalta ja näissä esimerkeissä, esimerkiksi 5G-tukiaseman aurinkosähköratkaisussa päätynyt siihen, että itse ICT-ratkaisun vaatima energia on vain joitakin prosentteja saavutettavista hyödyistä.³¹⁸ Käyttötavalla on vaikutusta ratkaisun omaan energiankulutukseen.

9.2.1. Ratkaisuja sähkön ja lämmön tuotannossa, jakelussa ja käytössä

Älykkään sähköverkon ratkaisut mahdollistavat laajemman uusiutuvan energian käytön joustavuuden lisääntyessä ja auttavat siten vähentämään päästöjä. Sähköverkossa tarvitaan erilaisia järjestelmää ylläpitäviä ja varmentavia reservejä. ICT edesauttaa järjestelmän kykyä ottaa vastaan entistä enemmän tuuli- ja aurinkovoimaa. Tuulivoimaloiden ja aurinkosähköyksiköiden invertterit, taajuusmuuttajat ja kontrollerit voivat myös edistää näiden tuotantomuotojen reagoimista sähköjärjestelmän tarpeisiin. Näillä toiminnoilla on merkittävä välillinen vaikutus päästöihin.

Suomessa sähköverkkojen taso on korkea ja automaatio viety jo pitkälle. Esimerkiksi sähkönsiirron ja -jakelun suhteelliset häviöt ovat jo nyt pienet globaalissa mittakaavassa ja niiden osalta merkittävää päästövähennystä ei ole saavutettavissa. Digitalisaation tuoma tarkempi monitorointi mahdollistaa kuitenkin tehokkaamman järjestelmän optimoinnin eri tilanteissa.

Asiakastasolla on selvästi enemmän mahdollisuuksia energiatehokkuuden parantamisessa ja sitä kautta päästöjen vähentämisessä. Jo asiakkaan tietoisuuden kasvattaminen omaan energiankäyttöön liittyen voi parantaa energiatehokkuutta 10–20 %.³¹⁹ ICT-ratkaisuilla voidaan mahdollistaa asiakkaalle yksittäisten kulutuslaitteiden tarkempi seuraaminen ja säätäminen.

³¹⁸ Esimerkkilaskelmia sisältävä VTT:n selvitys ICT:n hyödyistä energia-alalla julkaistaan myöhemmin.

³¹⁹ Aydin ym. 2018: Information provision and energy consumption: Evidence from a field experiment". Energy Economics.

Valtaosa 1990- ja 2000-luvulla rakennetuista tai päivitetyistä lämmitysjärjestelmistä suomalaisissa rakennuksissa ottaa huomioon muun muassa kellonajan, viikonpäivän ja ulkolämpötilan. Tämä ei olisi mahdollista ilman digitalisaatiota. Kaukolämmön ja -jäähdytyksen osalta digitalisaatio tarjoaa lisämahdollisuuksia muun muassa koneoppimisen hyödyntämiseen kysynnän ennustemallien, virhediagnostiikan, ennakoivan huollon ja talojen sisäisen lämmitysjärjestelmien optimoinnin kehittämisessä. Varsinkin kulluttajien energiamittarien tuottaman datan hyödyntäminen tarjoaa mahdollisuuksia uusille palveluille sekä järjestelmän tehokkaammalle hallinnalle.

Kaukolämpöverkon simulointimallit ja tuotannon optimointijärjestelmät ovat jo nyt kaukolämpöyhtiöillä yleisesti käytössä. Esimerkkejä tällaisista tuotteista ovat *Termis* (Schneider Electric, 2020) ja *DNA District Heating Manager* (Valmet, 2020).

”Digitaalinen kaksonen” (digital twin) -termillä kutsutut simulointiympäristöt edistävät monimutkaisempien energiajärjestelmien toteutusta. Näillä tarkoitetaan yleisesti todellisen kohteen digitaalista kopiota, joka on tiiviisti yhteydessä siitä kerättävään mittaustietoon. Tämä kopio voi olla täysin datapohjainen koneoppimisen menetelmiä hyödyntävä tai hiukan laveammin määriteltynä nykyisin jo käytössä oleva mallinnusmenetelmä (esimerkiksi simulointi- ja optimointimalli).

Digitalisaatio toimii myös kaukolämpösektorilla usein mahdollistajana, eli sillä saavutetaan välillisiä päästövähennyksiä. Kaukolämmön tapauksessa esimerkiksi talojärjestelmien älykäs säätö voi näkyä matalampina lämpötilatasoina rakennuksien sisäisissä lämmitysjärjestelmissä, mikä puolestaan mahdollistaa matalammat siirtolämpötilat kaukolämpöverkossa. Tämä puolestaan parantaa uusien vähähiilisten lämmönlähteiden teknistaloudellista kannattavuutta, edistää niiden käyttöönotossa ja voi lopulta johtaa päästövähennyksiin.

Lähtökohtaisesti tehokkain tapa säästää lämmityksen kuluja on laskea tilan lämpötilaa aina, kun tila ei ole aktiivisesti käytössä. Esimerkiksi Isossa-Britanniassa ja Irlannissa lämmitys usein katkaistaan lähdetäessä ulos, tosin tällöin palataan ikävästi kylmään tai minimilämpöiseen asuntoon ja asuinmukavuus kärsii. Parempi tapa onkin ohjata lämpötilaa huonekohtaisesti käyttötarkoituksen ja -tarpeen mukaan älykkäiden järjestelmien avulla, jolloin myöskään asumismukavuus ei kärsi. Tähän tarkoitukseen on jo saatavilla älykkäitä ohjausjärjestelmiä.

Lämmitysjärjestelmiä voidaan käyttää etäyhteyksillä ja optimoida täten lämmitykseen kuluva energiaa. Hybridilämmitysjärjestelmien, esimerkiksi öljy- ja hakelämmityksen ja sähkölämmityksen sekä erilaisten lämpöpumppujen ohjausta voidaan tehdä taloudellisin perustein. Myös lämmintä käyttövetä voidaan lämmittää optimaalisesti hyödyntäen esimerkiksi jäähdytyksen lauhdelämpöjä kesäisin.

Paikallisia energiavarastoja ja -joustoja voidaan käyttää tasaamaan tuotanto- ja kulutuskäyriä. Esimerkiksi varaavaa sähkölämmitystä ohjaamalla voidaan siirtää kulutusta pois kalliilta ja suuripäästöisiltä tunneilta pienemmän kuormituksen tunneille.

Paikallisella älykkyydellä voidaan myös hyödyntää omia energiantuotantolähteitä optimaalisesti. Tyypillisesti oma energiantuotanto on uusiutuvaa, esimerkiksi aurinkosähköä. Aurinkosähköä voidaan käyttää kiinteistöissä myös kulutusta ohjaten sekä akuston joustoja hyödyntäen. Järjestelmän optimoinnin avulla voidaan lisätä asennettavaa

aurinkosähkötehoa ja kasvattaa omatuotannon vuotuista osuutta sähkönhankinnasta. Toisaalta akustossakin syntyy energiahäviötä (5–30 % lämmöksi akun tyypistä riippuen): vaihtoehtona on tuotantoylijäämän syöttäminen verkkoon, jolloin energiataseen päästövähennysvaikutus on todennäköisesti suurempi kuin itse akun valmistuksen elinkaaripäästöt.

9.2.2. Esimerkkejä Suomesta

Smart Otaniemi

Smart Otaniemi -innovaatioekosysteemi keskittyy energian ja ICT-palveluiden rajapintaan. Tavoitteena on tutkia laajasti digitalisaation ja datatalouden mahdollisuuksia energiassa. Keskeisinä sovellusalueina on liikenne ja rakennukset.

Smart Otaniemi data-alustalle kerätään laajasti dataa alueen rakennuksista ja muista järjestelmistä. Alustan tavoitteena on mahdollistaa uudenlaisten datapohjaisten palveluiden ja menetelmien kehitys ja tutkimus. Alustalle kerätään dataa laajasti muun muassa energiankäytön, veden, sään, sisä- ja ulko-olosuhteiden ja käyttäjien osalta. Alustaa käytetään erilaisten monitorointi- ja optimointimenetelmien kehittämisessä, hyödyntäen myös koneoppivia malleja.

Smart Otaniemi alustalla tehdään muun muassa teho- ja energiaennusteita, energiankäytön analyyseja, lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmien parametrien optimointia, vika-diagnostiikkaa sekä tulosten visualisointia.

Otaniemen rakennuksia on mallinnettu tarkasti BIM-pohjaisina 3D-malleina sisältäen muun muassa rakenneratkaisuja, rakennusten pohjapiirroksia, laitteiden teknisiä tietoja ja erilaisia infrastruktuureita. Tällainen *Digital twin* -mallinnus mahdollistaa mittaustietojen ja simulointimallien yhdistämisen. Tätä kautta muun muassa uusien menetelmien vaikutuksia rakennuksen tilaan voidaan tarkastella entistä vapaammin.

Smart Otaniemi data-alustan hyödyntäminen energiatehokkuuden ja joustavuuden toteuttamisessa luo merkittäviä mahdollisuuksia päästövähennyksiin. Merkittävimmät mahdollisuudet ovat tyypillisesti rakennuksen lämmityksen ja jäähdytyksen optimoinnissa. Esimerkkitapauksissa on todettu optimoinnin johtavan jopa 10 % energian säästöön jäähdytyksessä ja 7 % säästöön lämmityksessä.³²⁰

Leanheat, Fourdeg, Salusfin ja Optiwatti

Useat toimijat (muun muassa Leanheat, Fourdeg, Salusfin, OptiWatti) tarjoavat kaikki laitteita ja palvelua kuluttajille energiakulutuksen ja sisäolosuhteiden hallintaan. Osa (kolme ensimmäistä) mahdollistaa ratkaisun myös kaukolämpöyhtiöille lämmön kysyntäjouston toteutusmalliksi. Kaukolämpöyhtiön näkökulmasta pelkän kulutuspuolen

³²⁰ Hasan ym. 2016: Automated optimum geometry generation of a building for the minimization of heating and cooling energy demands. Proceedings of the 3rd IBPSA-England Conference BSO.

osalta konsepti on hyödyllinen, sillä se varmistaa myös talon sisäisen lämmönjakelujärjestelmän tehokkaan toiminnan, ts. matalamman lämpötilatason ja hyvän jäähtymän sekä oikeat virtausmäärät kaukolämpöverkossa.

Toimijat kertovat älykkäällä ohjausjärjestelmällä saavutettavan keskimäärin 20 %, mutta yritykset kertovat markkinointimateriaalissaan suurimmillaan jopa 35 % tai 40 % kustannussäästöistä. Todelliset säästöt riippuvat kohteesta ja sen käyttötarkoituksesta ja -tavasta eli vertailutasosta. Asukas voi esimerkiksi hallita asumislämpötiloja huonekohtaisesti ja aikataulutettuna. Nyrkisääntönä Suomessa on perinteisesti ollut, että yhden asteen alhaisempi sisälämpötila alentaa lämmitysenergiaa viisi prosenttia. Toi:ssä ollessa (esimerkiksi 20 % ajasta) voisi välttää turhaa lämmittämistä samoin kuin yöaikaan (esimerkiksi 25 % ajasta). Kun lämmityksen säätö on helppoa esimerkiksi älypuhelimella, hyvän käyttöliittymän ja älykkään ohjausjärjestelmän avulla, kynnys aktiiviseen toimijuuteen alenee, kun helppouteen lisätään myös rahallinen säästö ilman, että asumismukavuudesta pitäisi tinkiä.

Kaukolämmön kysyntäjoustopotentiaali liittyy kiinteämmin rakennukseen ja kaukolämpöjärjestelmään. Jos kysyntäjousto antaa mahdollisuuden tasoittaa tai leikata voimakkaasti kulutuspiikkejä, taloudellinen merkitys voi kasvaa isoksi. Kaukolämpöverkon kustannussäästöpotentiaalin on kuitenkin arvioitu olevan melko maltillinen, 0,7 % tai 1,4 %, mikäli kysyntäjoustopotentialin tukena on lämpövarastoja.³²¹ Toisaalta tämä voidaan saavuttaa sisäilmaolosuhteiden vaarantumatta tai sisäilmaolosuhteet voivat jopa parantua.³²² Rakennusten älykkään ohjauksen ja tehokkaan toiminnan ansiosta voidaan kuitenkin saavuttaa suorien kustannussäästöjen lisäksi myös välillisiä etuja.

Optiwatti optimoi varaavan sähkölämmitystalon sähkön hankintaa esimerkiksi pörsisähkön mukaan muodostaen siten kysyntäjoustopotentiaalin. Kun kysyntä ohjautuu tunneille, jossa uusiutuvaa tuuli- ja aurinkovoimaa on paljon, ja markkinahinta täten on alhainen, myös päästövaikutukset minimoituvat. Toisenlaistakin joustoa on saatavilla.³²³

Talojärjestelmien tehokas toiminta ja ohjaus ovat potentiaalisesti tärkeitä tekijöitä siirryttäessä kohti matalampia siirtolämpötiloja kaukolämpöverkossa.³²⁴ Tämä puolestaan edistää hukkalämpöjen ja vähähiilisten lämmönlähteiden käyttöönottoa kaukolämmön tuotannossa. Tuotetta ja palvelua tarjoavat yritykset voivat toimia kaukolämpöyhtiöiden avainkumppaneina siirryttäessä perinteisen asiakasrajapinnan (lämmönjakokeskus) toiselle puolelle.

³²¹ Salo ym. 2019: The Impact of Optimal Demand Response Control and Thermal Energy Storage on a District Heating System. Energies.

³²² Mishra ym. 2019: Demand response events in district heating: Results from field tests in a university building. Sustainable Cities and Society.

³²³ <https://www.helen.fi/uutiset/2017/helen-tuo-kotitaloudet-osaksi-%C3%A4lyk%C3%A4st%C3%A4-energiaj%C3%A4rjestelm%C3%A4--edell%C3%A4k%C3%A4viiyys-tuntuu-s%C3%A4%C3%A4st%C3%B6n%C3%A4-s%C3%A4hk%C3%B6laskussa>

³²⁴ Tunzi ym. 2016: Method to investigate and plan the application of low temperature district heating to existing hydraulic radiator systems in existing buildings. Energy.

Kulutusjousto vähittäiskaupassa

VTT:n on yhdessä kumppaneiden kanssa tutkinut energian säästöpotentiaalia ja sähkön kulutusjoustoja vähittäiskaupassa esimerkkikohteena keskikokoinen kauppa. Tutkimuksessa selvitettiin kahta asiaa: ostettavan ja käytettävän sähköenergian kokonaismäärän minimoimista ja kulutushuippujen leikkaamista.

Ensimmäisen kysymyksen osalta selvitettiin, kuinka paljon kokonaisenergian kulutusta voidaan pienentää sekä toisaalta kuinka suuri osuus voidaan tuottaa paikallisesti päästöttömästi aurinkopaneelilla. Sekä energian kokonaiskulutuksen pienentäminen, että paikallinen päästötön tuotanto vaikuttavat CO₂-päästöjä pienentävästi. Laskelmissa on käytetty Suomen sähkön tuotannolle tyypillistä päästöarvoa 100 g/kWh. Tulevaisuudessa sähköntuotannon päästöt per kWh oletettavasti pienenevät, kun päästöttömän tuuli- ja ydinvoiman osuudet kasvavat. Toisen kysymyksen osalta selvitettiin, paljonko kulutuspiikkejä voidaan leikata koneoppimiseen ts. tekoälyyn perustuvan optimoinnin avulla. Tässäkin tapauksessa syntyy päästövähennyksiä, koska juuri kulutushuippujen aikana käytetään esimerkiksi kaasuvoimaloita, jotka tuottavat päästöjä.

Ostetun sähkötehon määrä pieneni päiväsaikaan 20–40 kW. Vähennykseen päästiin kaupan osajärjestelmiä (pakastealtaat, kylmäkaapit, ilmastointi, lämmitys jne.) optimaalaisesti digitaalisen ohjauksen ja IoT-mittausten avulla esimerkiksi niin, että ne eivät toimi toisiaan vastaan. Toinen merkittävä tekijä oli myymälän katolle asetetut aurinkosähköpaneelit.

Vähittäiskauppaliikkeen tyypillinen sähkönkulutus on 600 kWh neliometriä kohti vuodessa. Kokeilumarketissa tämä voitiin pudottaa 240 kWh/m², eli ostosähkön osuus putosi peräti 60 %. Koko kauppaketjun, jolla on 1800 myymälää, sähkön kulutus on 1,1 TWh vuodessa. Jos arvioidaan karkeasti, että S-ryhmä voisi vähentää puolet tai jopa saman 60 %, eli 0,33–0,66 TWh vähenisivät Suomen CO₂ päästöt vastaavasti 33 000–66 000 t (oletus verkkosähkön ominaispäästöstä 100 g/kWh).

Laskelma on optimistinen, koska kaupparyhmän sähkönkulutuksessa on mukana muitakin kuin myymälöitä, muun muassa keskusvarastoja, joissa säästöpotentiaali lienee pienempi. Vastaavasti kokeilussa koneoppivalla järjestelmällä voidaan optimoida kulutusjoustoja, eli tosin sanoen vähentää sähkön käyttöä ajankohdista, jolloin sähkön hinta ja päästöt ovat korkeat. Aiempaa kulutustietoa ja esimerkiksi sääennusteita hyödyntävä järjestelmä kykeni leikkaamaan kulutushuippuja 8,4 %.³²⁵

³²⁵ <https://phys.org/news/2017-06-finland-world-energy-saving-supermarket.html>

10. Johtopäätökset

Tässä raportissa kuvataan ICT-alan ilmasto- ja ympäristövaikutuksia tällä hetkellä saatavissa olevan kotimaisen ja kansainvälisen tiedon varassa. Raportti luo tilannekuvan, jonka pohjalta ICT-alan ilmasto- ja ympäristöstrategiaa valmisteleva työryhmä jatkaa toimenpide-ehdotusten ja suositusten laatimista.

ICT-alalla on kahtalainen rooli ilmaston ja ympäristön kannalta. Yhtäältä se kuluttaa energiaa ja materiaaleja ja tuottaa siten päästöjä ja esimerkiksi päätelaitteiden materiaalien louhinnan osalta vaikuttaa myös luonnonympäristöihin, toisaalta se mahdollistaa ympäristömyötäisiä ja ilmastoystävällisiä ratkaisuja muilla sektoreilla ja yhteiskunnassa yleisemmin. Digitalisaatiolla nähdään keskeinen, jopa välttämätön rooli kokonaisvaltaisessa muutoksessa, joka mahdollistaa taloudellisen hyvinvoinnin ympäristön kannalta kestävästi ja ilmastonmuutosta aiheuttavia kasvihuonekaasupäästöjä vähentäen.

ICT-alan ilmasto- ja ympäristövaikutusten vertailu ja kehityksen seuraaminen on haastavaa, sillä Suomessa tai kansainvälisesti ei käytössä systemaattista, yhteisesti sovitua tapaa raportoida alan energian- ja materiaalinkulutuksesta tai kasvihuonekaasupäästöistä. Alan tuottamien hyötyjen tarkka mittaaminen on vaikeaa: usein alalla on epäsuora uusien toimintatapojen ja päästövähennysten mahdollistajan rooli. Alan rajat ylittävä luonne, kuten se, että päivittäin käyttämämme data saatetaan merkittävilta osin käsitellä maamme rajojen ulkopuolella, hankaloittaa kattavan käsityksen saamista. Teknologian ja sovellusten ripeä kehitys vanhentaa tehdyt arviot nopeasti.

Alan ilmasto- ja ympäristövaikutuksia koskevien tietojen kattavuutta, saatavuutta ja vertailukelpoisuutta olisi parannettava kehityksen ymmärtämiseksi ja seuraamiseksi. Tietojen keruuta ja sen menetelmiä olisi kehitettävä tarkoituksenmukaiseksi ja alan toimijoiden kannalta toteuttamiskelpoiseksi.

Olemassa olevan tiedon perusteella nähdään, että energiatehokkuuden kehitys on auttanut alan sähköenergiankulutuksen kasvun pitämisessä toistaiseksi melko maltillisena huolimatta siirrettyjen, prosessoitujen ja säilytettyjen datamäärien moninkertaistumisesta. Viime aikaisissa tutkimusartikkeleissa alan arvioidaan muodostavan maailman sähköenergiankulutuksesta noin 7-10 %, mutta matalimpiinkin arvioihin, noin 4 %:iin päästään arvovaltaisissa lähteissä, kuten kv. televiestintäliiton ITU:n julkaisuissa. Suomessakaan alan sähkönkulutus ei ole räjähdysmäisesti kasvanut ja näyttäytyy osuudeltaan kokonaiskulutuksesta jopa jonkin verran kansainvälisiä arvioita pienempänä.

Maailman kasvihuonekaasupäästöistä ICT-alan osuus olisi noin 1,5–5 %. Sähköenergiankulutuksesta johtuvat kasvihuonekaasupäästöt riippuvat sähköntuotannon rakenteesta. Suomessa käytetty sähköenergia on tuotettu kansainvälisesti verrattuna varsin hiilivapaasti (2019: 35 % uusiutuvilla, 27 % ydinvoimalla, Ruotsi suurin tuontimaa), mikä alentaa alan hiilijalanjälkeä Suomessa. Lisäksi datakeskustoimijat ja teleyritykset Suomessa hankkivat aktiivisesti uusiutuvaa sähköä, mikä auttaa edelleen pienentämään yritysten hiilijalanjälkeä. Yhteiskunnan yleisestä sähköistymiskehityksestä huolimatta hiilettömän sähkönsäätävyyden näkymät nähdään Suomessa positiivisina ja sähkönkulutuksen hiilijalanjäljen odotetaan siten entisestään pienenevän tulevaisuudessa. Kysynnän kasvu kuitenkin vaikuttaa muun muassa vihreän sähkönsäätävyyden hintaan, joten energiatehokkuus voidaan nähdä jatkossakin tavoittelemisen arvoisena.

Energiatehokkaiden ja energiaa säästävien ratkaisujen käyttöönotto vaatii investointeja ja työpanostusta. Samaan aikaan, kun markkinoilla on saatavilla uusia energiatehokkaampia ratkaisuja, myös vanhaa laitekantaa on edelleen käytössä. Esimerkiksi datakeskuksissa on ollut niin Suomessa kuin maailmanlaajuisesti käynnissä pilvipalveluihin siirtyminen ja keskittyminen suuriin ja energiatehokkaampiin yksiköihin, mutta myös vanhempia, suhteellisesti enemmän käyttäviä konesaleja ja laitetoiloja on edelleen käytössä.

Datakeskusten sijoittumisen kannalta Suomen ilmasto-olot luovat luontaista etua, sillä jäähdyttämiseen kuluva energia muodostaa merkittävän osan datakeskuksen energiankulutuksesta. Suomessa on myös osaamista erittäin energiatehokkaiden (PUE-arvo hyvin lähellä lukua 1) datakeskusten toteuttamisesta ja esimerkkejä hukkalämmön hyödyntämisestä rakennusten lämmityksessä. Toisaalta hukkalämmön hyödyntämisessä olisi edelleen parannettavaa: datakeskusten toiminnan sivutuotteena syntyvää lämpöä hyödyntämällä voitaisiin merkittäväällä tavalla vähentää lämmitysenergian tuotannon tarvetta ja sitä kautta päästöjä.

Ohjelmistojen ja ICT:n avulla tuotettujen palvelujen energiatehokkuuden osalta keskustelu on vasta alussa. Esimerkiksi energiatehokkaan koodin tuottamiseen tulisi olla taloudellisia kannustimia, jotta se rohkaisisi käyttämään osajien työaikaa aiheen parissa. Samoin uusia teknologioita kehitetään pääosin muista lähtökohdista kuin energiatehokkuutta ajatellen. Tehokkaat ratkaisut edellyttäisivät näiden kysymysten huomiointia varhaisessa vaiheessa.

ICT-päätelaitteisiin liittyy suuria materiaalivirtoja. Elektroniikkajätteen määrä kasvaa jopa 7 % vuodessa globaalisti. Suomessa ei juurikaan tuoteta ICT-laitteita, mutta Euroopan mittakaavassa Suomi tuottaa suhteellisen paljon eräitä laitteisiin tarvittavia harvinaisempia metalleja. Suomessa louhittavien *high-tech*-metallien globaali kysyntä saattaakin jatkossa kasvaa. Laitteiden ympäristövaikutusta suomalaiset voivat pienentää tehostamalla kierrätystä, vaikka se ei yksin ratkaisekaan päätelaitteiden materiaali-
virtoihin liittyviä kestävyysvaikkeitä, jotka ovat herättäneet huomiota viime aikoina myös EU-tasolla. Metallit ovat laitteiden arvokkaimpia komponentteja, minkä lisäksi laitteissa on muovivaikkeitä ja lasia. Uudelleenkäsittely on usein haastavaa muun muassa arvokkaiden aineiden pienistä pitoisuuksista ja liittämistekniikoista johtuen.

Tulevaisuudessa ICT-alan energiankäyttöön vaikuttaa keskeisesti, miten energiatehokkuuden kehitys pystyy vastaamaan datan määrän kiihtyvään kasvuun. Ajanjaksolla 2017–2022 globaalin internetliikenteen on arvioitu lähes nelinkertaistuvan. Suomessa esimerkiksi mobiiliverkkojen energiatehokkuus on parantunut yli viisinkertaiseksi vuosina 2014–18, mutta samalla mobiiliverkoissa kulkevan datan määrä on yli kuusinkertaistunut. 5G-verkkojen standardien tavoitteet ovat jopa 100 kertaa edeltävää 4G:tä energiatehokkaampia, mutta samalla verkot mahdollistavat täysin uuden datansiirron tason, eikä energiatehokkuus automaattisesti muutu alenevaksi kokonaissähkökulutukseksi. Mobiiliverkkojen energiatehokkuuden kehittyminen käytännössä on olennaista mobiilipainotteisen Suomen kannalta. Lähtökohtaisesti mobiilitiedonsiirto vaatii enemmän energiaa kuin tiedonsiirto kiinteässä verkossa.

Energiatehokkuuden kehittymisen ja datamäärien kasvun rinnalla vähintään yhtä tärkeä kysymys on se, mihin dataa ja ICT-alan ratkaisuja tulevaisuudessa käytetään. ICT on jo monella alalla keskeinen päästövähennysten mahdollistaja, esimerkiksi uusiutu-

vaa energiaa ei voitaisi suuressa mittakaavassa käytännössä hyödyntää ilman digitalisaation apua. Avainasemassa on, otetaanko alan mahdollisuudet täysimääräisesti käyttöön asumisen, liikkumisen ja teollisen tuotannon energiankulutuksen, materiaalien käytön ja päästöjen vähentämisessä ja miten toimintatapamme muuttuvat teknologian tuomien mahdollisuuksien myötä. Esimerkiksi tekoälyn yleistymisellä nähdään valtava potentiaali uusien ratkaisujen tuottajana. Päästövähennysten mahdollistamisen lisäksi ICT voi tukea ilmastonmuutokseen sopeutumista siltä osin kuin muutosta ei enää voida estää, ja alan rooli ilmasto- ja ympäristötieteen ja esimerkiksi mallinnuksen parantamisessa on kiistaton.

Vaikka keskivertokuluttajan hiilijalanjäljestä ICT ei nykytilanteessa muodosta kovin suurta osaa verrattuna esimerkiksi asuntojen lämmitykseen ja liikkumiseen, kuluttajien välillä voi olla isoja eroja. Kuluttajat eivät välttämättä ole tietoisia oman ICT:n käyttönsä ympäristövaikutuksista tai mahdollisuuksistaan vaikuttaa siihen. Kuluttajan ICT-hiilijalanjälkeen vaikuttaa se, millä yhteyksillä ja laitteilla, millaisia palveluita ja miten paljon hän niitä käyttää. Tarkkapiirtoinen videotiedonsiirto mobiiliyhteyden kautta suurinäyttöllä laitteella kuluttaa enemmän energiaa kuin vaikkapa musiikin kuuntelu kiinteään verkkoon kytketyn vähän energiaa kuluttavan pienikokoisen laitteen kautta. Myös laitteiden kierrätykseen ohjaamista kuluttajilta voidaan parantaa.

Ehkä vielä merkittävämpää olisi saada paremmin käyttöön ICT:n potentiaali ihmisten asumisen ja liikkumisen päästöjen vähentäjänä. Ratkaisuja on jo tarjolla, esimerkiksi pientalon asukas voi saada aikaan jopa kymmenien prosenttien päästövähennykset ohjaamalla uusiutuvaan energiaan nojautuvaa ilmalämpöpumppujärjestelmää IoT-ratkaisun avulla. Energiankulutuksen hallintaan suunnitellun älykkään ohjausjärjestelmän hankinnan ja operoinnin voi rakennuksen haltija myös ulkoistaa.

Suomessa on runsaasti osaamista niin energiatehokkaan ICT-infrastruktuurin toteuttamiseksi kuin ICT:hen perustuvien energian- ja materiaalikulutusta vähentävien ratkaisujen kehittämiseksi teollisuuteen ja kuluttajille. Erilaisilla suomalaisten yritysten tarjoamilla ratkaisuilla voidaan nähdä merkittävääkin vientipotentiaalia, joka yhdistyy kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen.

Liite

Tieto- ja viestintäteknologiasektorin ilmasto- ja ympäristöstrategiaa valmisteleva työryhmä

Organisointi

Puheenjohtaja ja jäsenet:

Liikenne- ja viestintäministeriö
puheenjohtaja Päivi Antikainen, ilmasto- ja ympäristöyksikön johtaja
jäsen Atro Andersson, erityisasiantuntija

Aalto-yliopisto
jäsen Jukka Manner, professori

ABB Oy
jäsen Timo Kontturi, myyntijohtaja

CSC – Tieteen tietotekniikan keskus Oy
jäsen Klaus Lindberg, johtaja

Digita Oy
jäsen Henri Viljasjärvi, liiketoiminnan kehitysjohtaja

DNA Oyj
jäsen Hanna Haapakoski, yritysvaluupäällikkö

Elisa
jäsen Minna Kröger, yritysvaluupjohtaja

Energiateollisuus ry
jäsen Tuukka Heikkilä, asiantuntija

Energiavirasto
jäsen Johanna Kirkinen, yli-insinööri

Tietoliikenteen ja tietotekniikan keskusliitto FiCom ry
jäsen Elina Ussa, toimitusjohtaja

Finnet-liitto ry
jäsen Jarmo Matilainen, toimitusjohtaja

Oy IBM Finland Ab
jäsen Juhani Suhonen, johtaja, julkinen sektori

Kuluttajaliitto – Konsumentförbundet ry
jäsen Tiina Vyyryläinen, edunvalvonta-asiantuntija

Suomen Kuntaliitto ry
jäsen Pauliina Jalonen, asiantuntija (ilmasto)

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom
jäsen Jarno Ilme, toimialajohtaja

Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto
jäsen Jari Porras, professori

Neogames Finland ry; Ohjelmistoyrittäjät ry
jäsen Laura Rokkanen, Technical Manager (Rovio)

Nokia Oyj
jäsen Pia Tanskanen, Head of Environment

Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitra
jäsen Lotta Toivonen, asiantuntija

Pääkaupunkiseudun Smart & Clean -säätiö

Eetu Helminen, johtava asiantuntija (23.4. asti)
 Teknologiaateollisuus ry
 jäsen Helena Soimakallio, johtaja, kestävä kehitys
 Telia
 jäsen Eija Pitkänen, yritys vastuujohtaja
 TietoEVRY Oyj
 jäsen Kia Haring, viestintä- ja vastuullisuusjohtaja
 Työ- ja elinkeinoministeriö
 jäsen Timo Ritonummi, teollisuusneuvos
 Valtiovarainministeriö
 jäsen Markus Rahkola, erityisasiantuntija
 Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
 jäsen Tua Huomo, Executive Vice President
 Yleisradio Oy
 jäsen Irene Tommiska-Jarva, vastuullisen toiminnan päällikkö
 Ympäristöministeriö
 jäsen Elina Vaara, erityisasiantuntija

Sihteeristö:

Liikenne- ja viestintäministeriö
 Tuuli Ojala, erityisasiantuntija
 Liikenne- ja viestintävirasto Traficom
 Markus Mettälä, erityisasiantuntija

Väliraportin valmistelussa toimivat työryhmän asettamat kaksi alatyöryhmää. Alatyöryhmät ovat:

1. Infra (pj. Jarno Ilme, Liikenne- ja viestintävirasto Traficom)
2. Sovellukset (pj. Jenni Eskola, Liikenne- ja viestintävirasto Traficom)

Alatyöryhmiin on osallistunut työryhmän jäsenten lisäksi Timo Saatsi (ABB Oy), Ari-Pekka Ainonen (Digita Oy), Tero Seppälä (DNA Oyj), Jonas Kronlund (Elisa), Jarno Niemelä (Elisa), Juha Toivanen (Energia- ja viestintäministeriö), Mirja Tiitinen (Energiateollisuus), Marko Lahtinen (Tietoliikenteen ja tietotekniikan keskusliitto FiCom ry), Tuulikki Pöllänen (Oy IBM Finland Ab), Eka Ranta (Oy IBM Finland Ab), Pinja Oksanen (liikenne- ja viestintäministeriö), Laura Sarlin (liikenne- ja viestintäministeriö), Katariina Vuorela (liikenne- ja viestintäministeriö), Marja Heinonen (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom), Pertti Hölttä (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom), Pietari Päivänen (Neogames Finland ry; Ohjelmistoyrittäjät ry), Harry Kuosa (Nokia Oyj), Matti Pärssinen (Telia), Matti Tella (Telia), Jyri Kivinen (TietoEVRY Oyj), Juho Korteniemi (työ- ja elinkeinoministeriö), Kimmo Mäkinen (valtiovarainministeriö), Heikki Ailisto (Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy) ja Tapio Rauma (Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy). Lisäksi työhön ovat antaneet panoksensa myös useat muut jäsenorganisaatioiden ja yhteistyöorganisaatioiden edustajat.

